SÉRIE
DE LA GESTION
DE L'ÉNERGIE

9

À L'INTENTION
DES INDUSTRIES,
COMMERCES
ET INSTITUTIONS

Chauffage et refroidissement (vapeur et eau)

Energie, Mines et Ressources Canada
Energy, Mines and Resources Canada
Canada

PRÉFACE

L'art et la science de la gestion de l'énergie ont accompli des progrès remarquables au cours de la dernière décennie. La gestion de l'énergie est devenue une discipline sérieuse dans le cadre du processus de gestion de la plupart des entreprises qui connaissent le succès.

D'abord, au début des années 70, on a mis sur pied des programmes d'économie d'énergie afin de réduire la menace de pénurie d'énergie que pesait sur le Canada, de même que la dépendance du pays à l'endroit du pétrole étranger. Toutefois, la hausse vertigineuse des prix n'a pas tardé a donner une signification nouvelle à l'expression «économie d'énergie»: réduire le coût de l'énergie.

Nombre d'industries, de commerces et d'organismes publics ont relevé le défi et abaissé les coûts d'énergie jusque dans une proportion de 50%. On est ainsi arrivé à utiliser l'énergie de façon rationnelle, grâce à des mesures telles que des programmes d'information à l'intention du personnel, des moyens d'entretien plus à point, la simple élimination du gaspillage, et en mettant de l'avant des projets aptes à moderniser ou améliorer les installations et l'équipement.

Pour en arriver maintenant à économiser d'avantage l'énergie, il importe de mieux connaître la technologie et ses applications en plus d'avoir recours à des appareils à haut rendement énergétique.

A la demande du Programme d'économie d'énergie dans l'industrie canadienne, du Programme des groupes de travail sur la gestion de l'énergie dans les secteurs commercial et institutionnel, et d'associations professionnelles et commerciales intéressées, la Division de l'énergie industrielle du ministère de l'Energie, des Mines et des Ressources a élaboré une série de modules techniques portant sur la gestion de l'énergie.

Ces manuels aideront les gestionnaires et le personnel d'exploitation à découvrir les possibilités de gestion de l'énergie dans leur cadre de travail. On y trouve une quantité de renseignements pratiques, notamment des équations mathématiques, des renseignements généraux sur des techniques éprouvées, ainsi que des exemples concrets d'économie d'énergie.

Pour obtenir de plus amples renseignements concernant les modules figurant dans la liste qui suit ou la documentation utilisée dans le cadre des ateliers, y compris les études de cas, veuillez écrire à l'adresse suivante:

Division de l'énergie industrielle
Direction des économies d'énergie
Ministère de l'Energie, des Mines et des Ressources
580, rue Booth
Ottawa, Ontario
K1A OE4

Gestion de l'énergie et participation des employés
Évaluation de la consommation
Analyse financière énergétique
Compatibilité de la gestion énergétique
Récupération de la chaleur perdue
Isolation thermique des équipements
Éclairage
Électricité
Moteurs électriques économiseurs d'énergie
Combustion
Appareillage de chaufferie
Fours, sécheurs et fours de cuisson
Systèmes à vapeur et à condensat
Chauffage et refroidissement énergétique (Vapeur et eau)
Conditionnement de l'air
Refroidissement et pompes à chaleur
Systèmes de distribution d'eau et d'air comprimé
Ventilateurs et pompes
Compresseurs et turbines
Mesures et contrôles
Régulation automatique
Manutention des matériaux et transport sur place
Point de vue architectural
Accumulation thermique

Ministre des Approvisionnements
et Services Canada 1985
No. de cat. M91-6/9F
ISBN 0-662-93331-1

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
Objectif	1
Contenu	1
NOTIONS DE BASE	3
Énergie contenue dans la vapeur	3
Énergie calorifique	3
Chaleur	3
Unités d'énergie	4
Changement d'état	4
Vapeur saturée	5
Vapeur surchauffée	5
Qualité de la vapeur	5
Tables de vapeur	6
Transport de la vapeur	6
Modes de transmission de la chaleur	7
Transfert de chaleur par radiation	7
Transfert de chaleur par convection	7
Transfert de chaleur par conduction	9
Processus de condensation	9
Condensation en film	9
Condensation en gouttes	9
Purgeurs	10
Purgeurs sensibles à la température (à soufflet et à bilame)	10
Purgeurs thermodynamiques	10
Purgeurs sensibles à la masse volumique	10
Techniques de collecte du condensat	10
Fuites aux purgeurs	12
Fuites de vapeur	12
Vapeur instantanée et coup de bélier	12
Séparateurs de vapeur	12
Capacité d'extraction de condensat	14
Équation générale pour le calcul de l'échanger de chaleur	14

Écart logarithmique moyen de température (LMTD) 15

Effet de l'isolant sur le transfert de chaleur 16

Effet des mouvements de l'air sur le transfert de chaleur 16

Chauffage à la vapeur 20

Chauffage direct à la vapeur 20
Considérations pratiques sur le chauffage direct à la vapeur 21

Chauffage indirect à la vapeur 22
Serpentins à la vapeur 22
Vaisseaux à enveloppe chauffante 23
Échangeurs de chaleur 24
Rendement des échangeurs de chaleur 26
Aérothermes 27

Équipements refroidis à l'eau 29

Refroidissement direct 29

Refroidissement indirect 29

Source d'eau de refroidissement 29

Transfert de la chaleur 29

Analyse énergétique 30

Sommaire 31

APPAREILLAGE 33

Appareils chauffés à la vapeur 33
Sécheurs rotatifs 33
Évaporateurs 33
Appareils de chauffage d'ambiance 33
Préchauffeurs d'air 34
Machines frigorifiques à absorption 34
Machines stationnaires à chambre de vapeur 34
Appareils de vulcanisation 34

Appareils chauffés à la vapeur et refroidis à l'eau 34
Échangeurs de chaleur 34
Réservoirs de stockage 34
Vaisseaux à enveloppe de vapeur 34
Appareils de moulage en matrices 35

Appareils refrodis à l'eau 35
Compresseurs refroidis à l'eau 35
Bacs de refroidissement à l'eau 35
Refroidisseurs 35
Tunnels de refroidissement par aspersion 35
Divers appareils refroidis à l'eau 35

POSSIBILITÉS DE GESTION DE L'ÉNERGIE 37

Possibilités de maintenance 37

Exemples concrets de maintenance 37
1. Réparation des fuites 37
2. Réparation de l'isolant 38
3. Entretien des instruments 38
4. Entretien des purgeurs 38
5. Nettoyage des surfaces d'échange de chaleur 39
6. Vérification de la qualité de vapeur 39
7. Réduction de la température et de la pression de la vapeur 39
8. Vérification de la capacité des purgeurs 40
9. Inclinaison des serpentins de chauffage pour évacuer le condensat 40

Possibilités d'améliorations de coût modique 40

Exemples concrets d'améliorations de coût modique 41
1. Arrêt des équipements 41
2. Verrouillage des dispositifs de régulation 41
3. Marche des appareils à pleine charge 42
4. Emploi d'évents thermostatiques 42
5. Adjonction d'instruments de mesure et de contrôle 43
6. Choix de l'emplacement des instruments de régulation 43

Possibilités de rénovation 43

Exemples concrets de rénovation 43
1. Conversion du chauffage direct à la vapeur en chauffage indirect 43
2. Installation ou amélioration de l'isolation 45
3. Récupération de la chaleur des équipements à vapeur 45
4. Réexamen du chauffage du bâtiment 45
5. Stabilisation de la demande de vapeur et d'eau 45
6. Révision des horaires de marche en fonction de la demande de pointe 46
7. Récupération de la chaleur contenue dans les eaux rejetées 47

ANNEXES

A Glossaire
B Tables
C Conversions courantes
D Feuilles de travail

INTRODUCTION

Beaucoup d'installations de transfert de chaleur en service aujourd'hui ont été installées alors que le combustible ne coûtait pas cher et qu'on n'accordait pas beaucoup d'importance à la gestion de l'énergie. Par conséquent, plusieurs processus existants d'échange de chaleur n'ont pas un rendement satisfaisant sur le plan énergétique. Les augmentations du prix des combustibles ont sensibilisé l'intérêt des techniques de gestion de l'énergie applicables aux installations en place. Le présent module décrit comment on peut réaliser des économies d'énergie et de coûts en modifiant les installations et les méthodes d'exploitation.

Objectif

L'objectif du présent module se résume comme suit:

- Décrire sommairement les équipements de chauffage et de refroidissement (vapeur et eau) employés dans les secteurs industriel, commercial et institutionnel.
- Sensibiliser aux économies potentielles qui peuvent être tirées de la mises en oeuvre des «Possibilités de gestion de l'énergie».
- Etablir une procédure d'évaluation des économies énergétique et monétaire à l'aide d'équations, de méthodes de calculs et de feuilles de travail appliqués à des exemples concrets.
- Présenter une gamme de «Possibilités de gestion de l'énergie» à partir desquelles des économies typiques d'énergie et de coûts d'exploitation sont calculées.

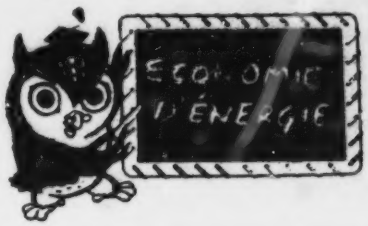
Le présent module contient également des informations qui aideront à reconnaître les «Possibilités de gestion de l'énergie» reliées aux équipements de transfert de chaleur. Les économies potentielles qui s'en suivent pourront être alors évaluées.

Contenu

En vue d'assurer une continuité dans la présentation, ce module a été subdivisé en trois grands chapitres:

- Le chapitre *Notions de base* couvre sommairement les notions de chauffage et de refroidissement (vapeur et eau), et donne des exemples qui feront bien comprendre les concepts de base employés dans les équations et les calculs.
- Le chapitre *Appareillage* décrit l'équipement typique de chauffage et de refroidissement (vapeur et eau) employé dans les secteurs industriel, commercial et institutionnel.
- Le chapitre *Possibilités de gestion de l'énergie* décrit diverses occasions d'économie et évalue les économies correspondantes d'énergie et de coûts tout en déterminant leur période de rentabilité.
- Les annexes comprennent un glossaire, des tableaux, des tables de conversion, et des feuilles de travail.

NOTIONS DE BASE



Toute équipement de chauffage et de refroidissement (vapeur et eau) fonctionne sur le principe que l'énergie calorifique se transmet toujours de la matière la plus chaude à la matière la plus froide.

Dans toute situation d'échange de chaleur, il faut chercher à maximiser le transfert de chaleur dans les situations de chauffage ou de refroidissement et à le minimiser dans les autres cas. De nombreuses possibilités de gestion de l'énergie existent à l'intérieur de tout système d'échange et de distribution de chaleur.

Il faut connaître certaines notions de base de l'échange de chaleur pour pouvoir analyser les consommations d'énergie, et c'est l'un des objectifs du présent chapitre.

Énergie contenue dans la vapeur

Lorsque l'eau est chauffée à la pression atmosphérique, sa température monte à 100°C. C'est la plus haute température que l'eau puisse atteindre sous cette pression. Un chauffage plus intense ne fait pas augmenter la température de l'eau: il transforme l'eau en vapeur. La quantité de chaleur que l'eau doit absorber pour atteindre son point d'ébullition se nomme la *chaleur sensible*. À partir de la température d'ébullition, la chaleur servant à transformer l'eau en vapeur est la *chaleur latente*.

Si l'eau est chauffée sous une pression supérieure à la pression atmosphérique, son point d'ébullition sera plus élevé que 100°C et la chaleur sensible requise sera plus élevée. Il existe donc pour chaque pression une température d'ébullition spécifique. Plus la pression est élevée, plus la température d'ébullition et la quantité de chaleur sensible augmentent. Si la pression est réduite, la quantité de chaleur sensible diminue et la température de l'eau descend au point d'ébullition correspondant à la nouvelle pression. Cela signifie qu'une certaine quantité de chaleur sensible est alors cédée par l'eau et qu'elle est alors transformée en chaleur latente à un petit volume d'eau, provoquant *la vaporisation instantanée*. Un exemple de ce phénomène se présente lorsque le condensat est évacué par un purgeur.

Énergie calorifique

La chaleur est une forme d'énergie. Le niveau d'énergie calorifique contenue dans un corps est mesuré par sa température. Plus la température est élevée, plus le corps contient de l'énergie. Dans la plupart des corps, le fait d'augmenter l'énergie contenue a pour conséquence d'augmenter leur température jusqu'au point d'ébullition. Certaines substances réagissent différemment à des températures spécifiques. Par exemple, en fournissant de la chaleur à de la glace, elle fond et se transforme en eau sans augmentation de sa température (chaleur latente de fusion). Pareillement, l'addition de chaleur à l'eau peut maintenir l'ébullition sans que sa température augmente (chaleur latente de vaporisation). L'unité d'énergie calorifique couramment employée dans le système SI (Système international d'unités) adopté au Canada est le joule.

Chaleur

L'énergie existant sous forme de chaleur, de travail et d'électricité peut être convertie en une autre forme seulement par les moyens suivants:

- Énergie mécanique en énergie électrique: à l'aide d'une génératrice électrique: rendement de 50% à 95%.
- Énergie mécanique en énergie calorifique: conversion possible, mais non pratique.
- Énergie électrique en énergie calorifique: à l'aide d'un élément chauffant; rendement de 100%.
- Énergie électrique en énergie mécanique: à l'aide d'un moteur électrique; rendement de 50 à 95%.
- Énergie calorifique en énergie mecanique: à l'aide d'un moteur thermique; rendement maximum de 40%.
- Énergie calorifique en énergie électrique: à l'aide d'un thermocouple, mais non pratique.

L'énergie est exprimée en calories, en joules et en wattheures.

Unités d'énergie

La calorie est la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1°C la température de 1 gramme d'eau. La calorie n'est pas reconnue dans le système SI.

Le joule (J) est une unité de travail du SI équivalant à la force de 1 newton agissant sur une distance de 1 mètre.

Le wattheure (Wh) est une unité du SI représentant la quantité d'énergie électrique consommée par le passage d'un courant de 1 ampère sous une différence de potentiel de 1 volt pendant une heure.

L'équivalence entre les joules, les wattheures et les calories s'établit comme suit:

1 calorie = 4 1855 joules

1 wattheure = 3 600 joules

Il est également juste de dire qu'un watt est un taux de production d'énergie correspondant à 1 joule par seconde.

Changement d'état

La température est une mesure de l'énergie calorifique contenue dans une matière. L'eau à la pression atmosphérique bout à 100°C et la glace fond à 0°C. Lorsque la température d'un corps est abaissée à −273°C ou 0 K (zéro absolu), ce corps ne contient plus aucune énergie calorifique. En ajoutant de la chaleur, la température augmentera jusqu'à ce qu'un changement d'état se produise.

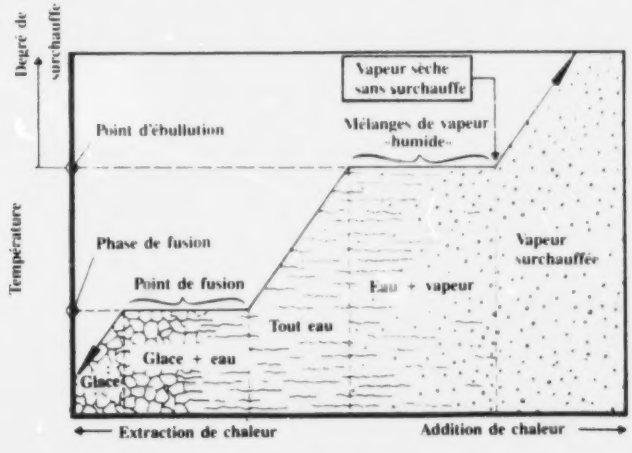
La plupart des corps subissent un changement d'état à une température précise, sans provoquer une augmentation de leur température jusquà ce que la transformation soit complète. Des exemples typiques sont la fusion de la glace, ou l'ébullition de l'eau. La figure 1 représente le processus de changement d'état.

La plupart des corps purs ont une température spécifique de *fusion* et de *congélation*. La pression extérieure n'a que peu ou pas d'effet sur cette température, de sorte que la fusion ou la congélation ne peut se produire à aucune autre température.

En ajoutant de la chaleur à la glace, elle commence à fondre à 0°C. La quantité de chaleur nécessaire pour faire fondre 1 kilogramme de glace à 0°C et le transformer en 1 kilogramme d'eau à 0°C se définie comme la *chaleur latente de fusion* de l'eau (334,92 kJ/kg). En soutirant cette même quantité de chaleur de 1 kilogramme d'eau à 0°C, elle se transforme en 1 kilogramme de glace à 0°C.

La chaleur latente de fusion de la plupart des corps purs est indiquée dans les tables de propriétés physiques. La chaleur latente de fusion des mélanges et des corps hétérogènes doit être déterminée de façon empirique.

Contrairement à la congélation et à la fusion, l'*évaporation* se produit à différentes températures. L'évaporation est la dispersion sous forme de gaz des molécules situées à la surface d'un liquide. Le taux d'évaporation est à son maximum au point d'ébullition. Lorsqu'un liquide a atteint sa température d'ébullition, il faut fournir de l'énergie calorifique supplémentaire pour qu'il se transforme en gaz (par exemple, de l'eau en vapeur). Cette quantité de chaleur supplémentaire est la *chaleur latente de vaporisation*. Pour l'eau, la chaleur latente de vaporisation est 2 256,9 kJ/kg sous une pression de 101,35 kPa (abs.) et une température de 100°C.



Exemple de changement d'état
Figure 1

L'eau, l'alcool et l'essence s'évaporent à toutes températures, leur taux d'évaporation augmentant avec des températures plus élevées. Les gaz évaporés exercent une pression appelée la *pression de vapeur*. Quand la température d'un liquide monte, il y a une plus grande perte de liquide à la surface: cela augmente la pression de vapeur. Lorsque la pression de vapeur atteint la pression des gaz environnants, l'ébullition se produit. L'ébullition de l'eau à la pression atmosphérique produit de la vapeur à 101,325kPa (abs.). Si la pression exercée sur la surface est augmentée, l'ébullition se produit à une température plus élevée.

L'évaporation et l'ébullition de l'eau peuvent être provoquées sous une pression inférieure à la pression atmosphérique. Des exemples se présentent dans l'emploi d'évaporateurs sous vide qui concentrent des solutions de sucre, de jus d'orange ou de lait, dans lesquels l'excès d'eau est éliminé par ébullition à des températures de 40 à 60°C. Cette opération préserve la saveur du concentré.

Vapeur saturée

Lorsque la vapeur s'échappe de la surface de l'eau en ébullition, que ce soit dans un appareil ouvert à l'atmosphère ou sous pression, c'est de la *vapeur saturée*. Si on enlève de la chaleur de cette vapeur, elle se condense en eau. Par exemple, la vapeur qui s'échappe de la surface de l'eau en ébullition se refroidit rapidement au contact de l'air environnant et se condense. La vapeur condensée apparaît sous forme de gouttelettes en chute libre au-dessus du niveau d'eau. Dans une conduite de vapeur, les gouttelettes se rassemblent en gouttes plus grosses qui retombent au bas de la conduite pour former du *condensat*, que les purgeurs ont pour rôle d'évacuer.

Vapeur surchauffée

La *vapeur surchauffée* est produite en chauffant la vapeur saturée à une température supérieure à la température de saturation. Puisque la vapeur surchauffée ne contient pas d'eau libre, l'enthalpie (autrement dit, la chaleur contenue) peut être déterminée en consultant directement les tables de vapeur surchauffée d'après les conditions de température et de pression existantes. La quantité de surchauffe de la vapeur est exprimée en degrés de surchauffe, c'est-à-dire par le nombre de degrés Celsius excédant la température de saturation.

La vapeur surchauffée n'est pas idéale pour les applications de chauffage, car la température de surchauffe peut difficilement être maintenue à une valeur constante, et la capacité calorifique par unité de volume est plus faible que celle de la vapeur saturée. De plus, les conduites qui la transportent doivent être plus grosses pour un même poids de vapeur. L'échange de chaleur peut être augmenté par la *désurchauffe* de la vapeur. La méthode la plus courante pour désurchauffer consiste à pulvériser de l'eau dans la vapeur.

Qualité de la vapeur

Lorsque la vapeur saturée s'échappe de la surface de l'eau dans un ballon de chaudière, il devrait s'agir idéalement d'une vapeur pure à la température et à la pression de saturation. Cependant, de minuscules gouttelettes d'eau s'échappent avec la vapeur. Le rapport entre la masse de vapeur pure et la masse totale est définie comme la qualité de la vapeur.

La qualité de vapeur peut être exprimée par l'équation suivante:

$$\text{Qualité } (x) = \frac{\text{masse de vapeur}}{\text{masse totale}}$$

Si la qualité de vapeur est 1, cela signifie que la vapeur ne contient pas d'eau. Il s'agit alors d'une vapeur sèche et saturée. À mesure que la vapeur se refroidit, sa qualité se détériore. Le pourcentage en poids de l'eau contenue dans la vapeur peut être déterminé par l'équation:

$$\text{Pourcentage d'eau} = 100\% - (\text{qualité} \times 100)$$

Par exemple, si la qualité de vapeur est de 0,98, le pourcentage d'eau se calcule comme suit:

$$= 100 - (0{,}98 \times 100)$$

$$= 100 - 98$$

$$= 2\%$$

La qualité de vapeur est une valeur associée à une vapeur saturée, à la pression et à la température de saturation.

Tables de vapeur

Les tables de vapeur servent à évaluer la quantité d'énergie contenue dans l'eau ou la vapeur (table 1 et 2). Elles servent également à déterminer les températures de saturation et les volumes spécifiques de vapeur et d'eau à différentes pressions. Les explications suivantes sur les propriétés de la vapeur et de l'eau aideront à utiliser les tables de vapeur.

- Pression (kPa). La pression employée dans les tables de vapeur est la pression de saturation exprimée en kPa absolus. La pression effective est toujours de 101,325 kPa inférieure à la pression absolue car son point de référence se situe à la pression atmosphérique. Pour obtenir la pression absolue, il faut donc ajouter 101,325 kPa à la pression effective.
- Température de saturation (°C). La température de saturation est la température à laquelle l'ébullition produit de la vapeur à une pression donnée. Par exemple, si une chaudière produit de la vapeur saturée à 374,68 kPa (eff.), elle fonctionne à une température de 150°C.
- Volume spécifique du liquide saturé, v_f (m^3/kg). Cette valeur est le volume en mètres cubes occupé par 1 kilogramme d'eau à la température de saturation. Tel qu'indiqué, cette valeur est constante sur une large gamme de températures. L'augmentation du volume spécifique sous l'effet d'une hausse de température est en relation réciproque avec la diminution de la masse volumique se produisant pour la même hausse de température. La masse volumique de l'eau est de 1 000 kg/m^3 à la température ambiante normale.
- Volume spécifique de la vapeur saturée, v_g (m^3/kg). Le volume spécifique de la vapeur saturée est le volume en mètres cubes occupé par 1 kilogramme de vapeur saturée sèche à la pression correspondante.
- Enthalpie (kJ/kg). Les tables de vapeur sont établies en considérant que l'eau à 0°C ne contient pas d'énergie. L'énergie totale contenue dans l'eau, la vapeur ou un mélange des deux, est appellée l'enthalpie du fluide, exprimée en kilojoules par kilogramme. Sous la rubrique Enthalpie, il y a trois colonnes identifiant l'enthalpie du liquide (h_f), l'enthalpie d'évaporation (h_{fg}), et l'enthalpie de la vapeur (h_g).

L'*enthalpie du liquide (h_f)* est une mesure de la quantité d'énergie calorifique contenue dans l'eau à une température spécifique.

L'*enthalpie d'évaporation (h_{fg})* (plus correctement appelée chaleur latente de vaporisation) est la quantité d'énergie calorifique nécessaire pour convertir 1 kilogramme d'eau en 1 kilogramme de vapeur sous une pression donnée.

L'*enthalpie de la vapeur (h_g)* est la quantité totale d'énergie calorifique contenue dans la vapeur saturée sèche sous une pression donnée. Cette quantité d'énergie est la somme de l'enthalpie du liquide (h_f) et de la quantité d'énergie nécessaire pour évaporer 1 kilogramme d'eau à une température donnée (h_{fg}).

Ces trois valeurs d'enthalpie peuvent être exprimées de la façon suivante:

$$h_g = h_f + h_{fg}$$

dans laquelle h_g = enthalpie de la vapeur (kJ/kg)

h_f = enthalpie du liquide (kJ/kg)

h_{fg} = enthalpie d'évaporation (kJ/kg)

Cette relation s'applique à la vapeur saturée quelle que soit sa pression.

Transport de la vapeur

La vapeur est produite par une chaudière ou par une batterie de chaudières dans un endroit généralement éloigné des appareils utilisant de la vapeur. La vapeur doit alors être acheminée par divers ensembles de tuyauterie et robinetterie jusqu'à sa destination finale. Si les principes de base intervenant dans le transport de la vapeur ne sont pas bien compris, des erreurs très coûteuses peuvent être faites lors de la conception des circuits de distribution.

Pour concevoir correctement un réseau de tuyauterie devant transporter de la vapeur, il faut connaître les données suivantes:

- la température et la pression de la vapeur,
- la quantité de vapeur à transporter,
- la distance sur laquelle la vapeur sera transportée.

Dans le calcul du diamètre des conduites de transport de la vapeur, il est recommandé de garder la vitesse de la vapeur à l'intérieur de limites pratiques. Il est généralement satisfaisant d'utiliser une vitesse de 40 à 60 m/s, avec un maximum de 75 m/s. Si la conduite est trop grosse, une perte inutile de chaleur en résultera à cause des trop grandes surfaces d'échange. En plus, on paye plus cher pour les conduites et leur isolation. Par contre, si la conduite est trop petite, elle provoquera un bruit excessif à cause de la vitesse accrue de l'écoulement de la vapeur, ainsi qu'une perte de charge excessive et une réduction de la capacité de transport. La vitesse de la vapeur saturée circulant dans une conduite peut être déterminée à l'aide de l'équation suivante:

$$V = \frac{w \times v_g}{A \times 3\,600}$$

dans laquelle V = vitesse de la vapeur (m/s)

w = débit de vapeur (kg/h)

A = section intérieure de la conduite (m^2)

v_g = volume spécifique de la vapeur saturée à la pression de service (m^3/kg)

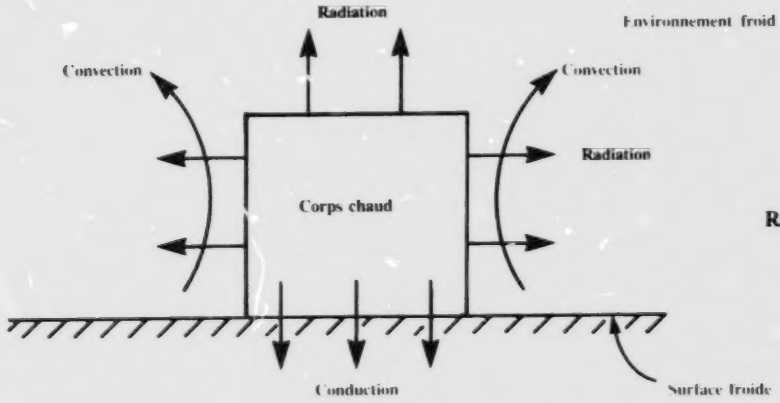
3 600 = conversion d'unités, heures à secondes

La feuille de travail 9-1 est prévue pour ce calcul, dont un exemple est présenté ci-après.

Modes de transmission de la chaleur

Un corps chaud cède sa chaleur de trois façons (Figure 2)

- par radiation;
- par convection, au fluide qui l'entoure;
- par conduction, aux autres corps qui sont en contact avec lui.



Radiation — Convection — Conduction
Figure 2

Transfert de chaleur par radiation

Dans le transfert de chaleur *par radiation*, un corps plus chaud cède de la chaleur à un corps plus froid sans que les deux corps soient en contact. La chaleur transmise de cette façon est dite chaleur radiante. Tout objet libère continuellement de la chaleur radiante. L'intensité de cette radiation dépend de la température et de la nature de la surface.

Lorsque les ondes de radiation rencontrent un autre corps, l'énergie qu'elles contiennent est absorbée par la surface de ce corps. La chaleur transmise par radiation augmente à mesure que la température d'un corps s'élève. À des températures voisines de la température ambiante, la chaleur transmise par radiation est négligeable.

Transfert de chaleur par convection

Le transfert de chaleur *par convection* fait intervenir simultanément la conduction de chaleur, l'accumulation de l'énergie et un mouvement dans le fluide. La convection est le mode d'échange de chaleur le plus important entre un solide et un liquide ou un gaz.

Calcul de la vitesse de circulation de la vapeur

Feuille de travail 9-1

Entreprise: COMPAGNIE XYZ LTÉE Date: 20 FÉVRIER 1985

Endroit: ANYTOWN Par: MBE

Diamètre intérieur de la conduite de vapeur 0,1541 m

Débit de vapeur (w) 13 608 kg/h

Volume spécifique de la vapeur (v_g) 0,25888 m^3/kg

Section de la conduite (A) $= \frac{3{,}142 \times (\text{diam. int.})^2}{4}$

$= \frac{3{,}142 \times (\ 0{,}1541\ )^2}{4}$

$= 0{,}0187\ m^2$

Vitesse (V) $= \frac{w \times v_g}{A \times 3\,600}$

$= \frac{13\,608 \times 0.25888}{0{,}0187 \times 3\,600}$

$= 52{,}33$ m/s

Pour les conduites principales de vapeur, la vitesse devrait se situer entre 40 et 60 m/s. Si la vitesse dépasse 75 m/s, il faut réduire le débit ou employer une conduite de plus grand diamètre.

Le transfert de chaleur par convection se produit en plusieurs étapes. Tout d'abord, la chaleur passe par conduction de la surface aux particules d'un fluide adjacent. L'énergie transmise augmente la température et l'énergie interne des particules du fluide. Ces particules se déplacent vers une zone où la température est plus basse et transmettent la chaleur à d'autres particules. Il existe à la fois un mouvement de chaleur et un mouvement du fluide. L'effet net est un échange d'énergie, et puisqu'il s'opère dans le sens du gradient température, on l'appelle *flux de chaleur par convection*.

Dans le transfert de chaleur par convection, on distingue la *convection naturelle* et la *convection forcée*. Lorsque les courants de convection sont provoqués par les seules différences de masse volumique résultant des différentiels de température, la convection est dite naturelle. Lorsque les courants de convection sont provoqués par un agent extérieur tel qu'une pompe ou une soufflante, la convection est dite forcée.

L'intensité de la transmission de chaleur par convection dépend pour une grande part des courants de convection. Ce mode de transmission de la chaleur dépend des caractéristiques d'écoulement des fluides. Il ne peut pas se produire sous vide.

Transfert de chaleur par conduction

Dans le transfert de chaleur *par conduction*, la chaleur passe d'une zone plus chaude vers une zone plus froide à l'intérieur d'un milieu (solide, liquide ou gaz), ou entre deux objets différents se trouvant en contact physique direct. L'énergie est transmise par contact moléculaire direct sans qu'il y ait un déplacement appréciable des molécules. L'effet obtenu par la transmission de chaleur par conduction est une mise en équilibre des températures. Cependant, si les différences de température sont entretenues par l'application ou l'extraction de chaleur en différents points, un transfert de chaleur est maintenu de la zone plus chaude vers la zone plus froide.

La conduction est le seul mode de transfert de chaleur entre des solides opaques. La conduction est également importante dans les fluides, mais dans les milieux autres que solides, elle est généralement combinée avec la convection et même, dans certains cas, avec le rayonnement.

Processus de condensation

Deux types de condensation peuvent se produire, isolément ou en association: il s'agit de la condensation en film et de la condensation en gouttes.

Condensation en film

Lorsqu'une vapeur saturée pure vient en contact avec une surface plus froide, elle se condense en formant un film sur la surface. Si par gravité le condensat coule le long de la surface, et qu'un écoulement constant existe dans toute l'épaisseur du film, le transfert de chaleur à travers ce film se produit par conduction. Puisqu'il s'agit de conduction, l'épaisseur du film de condensat a une influence directe sur la quantité de chaleur transmise. L'épaisseur du film dépend de la vitesse à laquelle le condensat est enlevé. Sur une surface verticale, à cause de l'action de la gravité, le film est plus épais dans le bas que dans le haut. Plus la surface s'éloigne de la verticale, plus l'épaisseur du film augmente.

La température du film est la moyenne de la température de la surface et de la température de la vapeur. Une augmentation de la température du film réduit sa viscosité aussi bien que son épaisseur, car si la viscosité diminue, la vitesse de retombée du film augmente. L'épaisseur du film est également réduite si la vitesse de circulation de la vapeur est grande, à cause de l'entraînement du film de condensat par la vapeur. La vapeur devrait circuler dans le même sens que l'écoulement du condensat. À mesure que la transmission de chaleur augmente à cause de l'augmentation de l'écart de température entre la vapeur et la surface, l'épaisseur du film de condensat augmente. La conductance de la surface diminue lorsque l'écart de température augmente, ce qui est une relation inhabituelle.

Les équations servant au calcul de la conductance d'un film de condensat font intervenir la conductivité thermique, la viscosité et la masse volumique du condensat, ainsi que l'écart de température entre la vapeur et la surface, et certains caractères géométriques de la surface, tels que la hauteur dans le cas d'une surface verticale et le diamètre dans le cas d'une conduite horizontale. Ces équations sont données dans les ouvrages traitant de la transmission de la chaleur.

Condensation en gouttes

Sur les surfaces contaminées par une substance qui empêche le condensat de mouiller la surface, la vapeur se condense en gouttes et non en film. C'est ce que fait le mercaptan benzylique sur le cuivre ou le laiton, et l'acide oléique sur le cuivre, le laiton, le nickel ou le chrome. Dans ces conditions, une grande partie de la surface n'est pas couverte par un film d'eau isolant et permet un échange de chaleur sans obstacle. C'est ce qu'on appelle la condensation en gouttes. La conductance d'un condensat en gouttes est de 4 à 8 fois plus élevée que celle d'un condensat en film. Puisque la condensation en gouttes est un phénomène rare, il est préférable de calculer les échanges de chaleur à l'aide des coefficients de condensation en film qui sont donnés dans les ouvrages traitant du transfert de la chaleur.

Purgeurs

Les purgeurs ont pour rôle d'évacuer tout condensat, air et gaz non condensable emprisonné dans les appareils et conduites contenant ou transportant de la vapeur, afin de permettre un chauffage rapide du produit et des équipements. Les purgeurs sont des appareils de robinetterie qui évacuent le condensat et l'air sans laisser sortir la vapeur. Au moment du démarrage des appareils et du réchauffage des conduites de vapeur, les purgeurs expulsent l'air emprisonné. Pendant la marche continue, ils continuent d'évacuer les petites quantités d'air et de gaz non condensables qui sont entraînées dans le système par l'eau d'alimentation de la chaudière.

Certains purgeurs sont à crépine intégrée qui protège contre les impuretés et l'entartrage. Il faut éliminer ces dépôts car le purgeur pourrait être bloqué en position ouverte et la vapeur s'échapperait librement dans le circuit d'évacuation du condensat. Il existe aussi des purgeurs munis de clapets de retenue empêchant tout retour de condensat. En consultant les fabricants de purgeurs ou leurs catalogues, de plus amples détails pourront être obtenus sur les purgeurs, dont les types les plus courants sont décrits ci-après.

Purgeurs sensibles à la température (à soufflet et à bilame)

Il y a deux types de purgeurs sensibles à la température, ou thermostatiques. Le purgeur à soufflet fonctionne par la dilatation d'un soufflet rempli de liquide, et le purgeur à bilame par la dilatation d'un élément bimétallique. Ces deux types de purgeurs sont actionnés par une différence de température. Lorsqu'ils sont froids, ils sont ouverts pour évacuer l'air et le condensat lors du démarrage. La vapeur est en contact direct avec le robinet, mais un retard à la fermeture se présente avec ces deux types de purgeurs. Le fonctionnement des purgeurs sensibles à la température est amélioré en utilisant un grand mamelon purgeur pour laisser au condensat le temps de se refroidir. Ces appareils peuvent être endommagés par les effets de coup de bélier. Ils sont généralement économiques pour des pressions de vapeur supérieures à 41 kPa (eff.).

Purgeurs thermodynamiques

Les purgeurs thermodynamiques sont également appelés purgeurs à disque. Ces appareils sont généralement employés lorsque la pression est supérieure à 56 kPa (eff.) et lorsque la pression en aval est inférieure à la moitié de la pression en amont. Ces appareils ne risquent pas d'être endommagés par les effets de coup de bélier.

Purgeurs sensibles à la masse volumique

Les purgeurs sensibles à la masse volumique sont le purgeur à flotteur fermé, et le purgeur à flotteur inversé ouvert. Le purgeur à flotteur fermé est capable d'évacuer le condensat de façon continue, mais il ne peut chasser l'air à moins d'être muni d'un évent sensible à la température. Un coup de bélier peut provoquer la défaillance de ce type de purgeur.

Le purgeur à flotteur inversé ouvert est probablement le type le plus employé. Le purgeur est ouvert lorsqu'il est froid, mais il ne peut pas évacuer de grandes quantités d'air au moment du démarrage à moins d'être muni d'un évent sensible à la température. Ce type de purgeur permet une évacuation rapide du condensat.

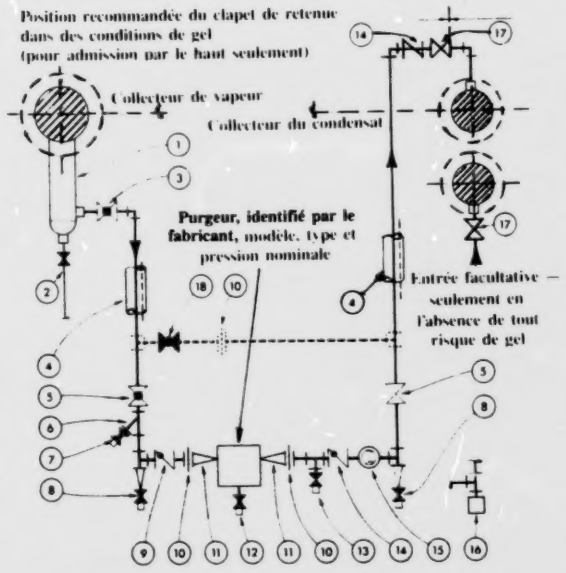
Techniques de collecte du condensat

La figure 3 représente la disposition de la tuyauterie recommandée pour l'installation des purgeurs sur la plupart des appareils chauffés à la vapeur.

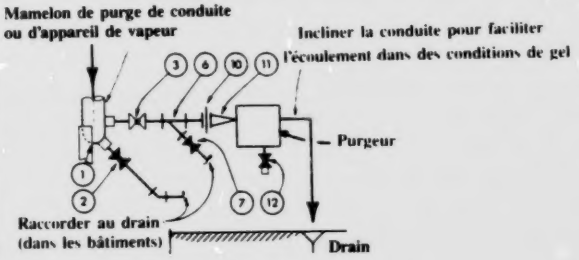
Il faut tenir compte des points suivants pour tout montage de purgeurs.

- Grouper les purgeurs d'une façon ordonnée pour assurer la facilité d'entretien.
- La tuyauterie, des robinets et des raccords doivent être de la même grandeur que les raccordements du purgeur, mais jamais inférieur à NPS 3/4.
- Normalement, les purgeurs doivent être installés plus bas que l'appareil ou le dispositif qu'ils desservent.
- Chaque appareil utilisateur de vapeur doit être muni de ses propres purgeurs.
- Prévoir des purgeurs à tous les points bas des conduites principales de vapeur, pour en évacuer le condensat se formant lors du démarrage.
- Si possible, selon la configuration des tuyères de l'échangeur de chaleur, poser un mamelon purgeur au point milieu des calandres de l'échangeur. Poser des mamelons purgeurs doubles à chaque extrémité ou près de chaque extrémité de l'échangeur.
- S'il y a danger de gel et lorsque le condensat n'est pas vidangé dans un système de collecte, choisir des purgeurs de type thermostatique qui ne formeront pas de poche d'eau et qui seront montés verticalement pour se vidanger par gravité. Autrement, choisir des purgeurs pouvant être munis d'un dispositif de vidange automatique intégré.

- S'il y a danger de gel, éviter de longues sections de conduites horizontales d'évacuation car de la glace pourrait se former dans la conduite en aval du purgeur. Utiliser de courtes conduites d'évacuation, et si le condensat n'est pas vidangé dans un système de collecte, incliner les conduites d'évacuation vers le bas pour qu'elles puissent se vidanger d'elles-mêmes.
- Pour les appareils consommant de grandes quantités de vapeur, envisager l'emploi d'un séparateur de vapeur dans la conduite d'alimentation. Les séparateurs de vapeur seront discutés plus loin dans le présent module.
- Dans le cas des machines tournantes, l'emploi d'un siphon s'impose pour évacuer le condensat. La pression de la vapeur sert à forcer (action de siphon) le condensat à remonter dans un tube jusque dans le purgeur (figure 4).



Condensat vers la conduite de retour



Pour l'évacuation du condensat

Légende

1 Mamelon de purge du collecteur de vapeur, ou de la conduite d'alimentation ou de sortie de l'appareil à vapeur.

2 Robinet de purge pour l'évacuation périodique des sédiments. Par sécurité, cette tuyauterie doit être prolongée directement à l'égout ou près du sol.

3 Robinet d'isolement, à poser près de la conduite de purge.

4 ★ Isolant. Nécessaire dans un environnement froid si le condensat risque de geler en cas d'arrêt de marche ou de marché intermittente. Par très grand froid, le chauffage de la tuyauterie peut aussi être nécessaire — si la vapeur n'est pas constamment disponible, employer un câble chauffant.

5 ★ Robinet d'isolement. Nécessaire seulement si les robinets (3) et (17) sont inaccessibles ou si une conduite de déviation est employée — voir note (18).

6 Crépine. Normalement prévue dans les conduites de moins de 2 po de diamètre en amont des purgeurs. La crépine peut être intégrée au purgeur.

7 ★ Robinet pour purger les sédiments de la crépine à l'atmosphère. Bouchon nécessaire pour la sécurité.

8 ★ Robinet de vidange manuel pour emploi dans les conditions de gel si le purgeur est à montage horizontal — voir note (16).

9 ★ Clapet de retenue. Nécessaire dans les conduites munies de purgeurs à flotteur inversé pour assurer l'étanchéité en cas d'inversion de la pression différentielle dans le purgeur lors de la vidange de la conduite ou d'une crépine en amont du purgeur.

10 Raccords-unions pour enlever le purgeur, etc.

11 ★ Réducteur pour adapter le purgeur aux dimensions de la conduite.

12 ★ Robinet de purge pour un purgeur à crépine intégrée (option remplaçant (6) ci-dessus).

13 ★ Robinet d'essai montrant si un purgeur défectueux évacue de la vapeur. Certains purgeurs ont un orifice taraudé pour recevoir ce robinet.

14 ★ Clapet de retenue empêchant le retour par le purgeur lorsque le condensat est évacué par plusieurs purgeurs dans un collecteur commun. En position basse, le clapet bénéficie d'une colonne d'eau pour se refermer et permet un joint hydraulique. Nécessaire si plusieurs purgeurs refoulent ou évacutnt dans un collecteur, sous pression ou non.

15 ★ Hublot de verre permettant de voir si un purgeur refoule ou évacue correctement dans une conduite de retour de condensat sous pression. Rarement employé car le verre peut s'éroder ou éclater.

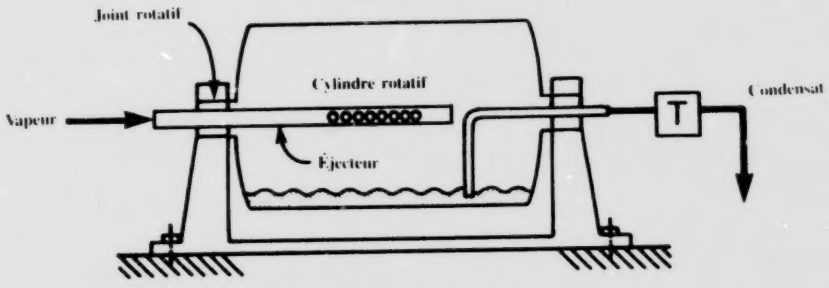
16 ★ Drain (automatique) sensible à la température permettant à la conduite de se vider, pour empêcher tout avarie en cas de gel (voir note 4). Si le clapet (14) est au-dessus, le purgeur peut être à vidange automatique.

17 Robinet d'isolement du collecteur.

18 ★ Conduite de déviation (by-pass) est non recommandée car elle peut être laisser ouverte par inadvertance. Il vaut mieux prévoir un purgeur de secours.

★ L'astérisque repère les éléments facultatifs, non essentiels à la conception de base de la tuyauterie des purgeurs.

Figure 3



Disposition du purgeur sur un cylindre rotatif
Figure 4

Fuites aux purgeurs

Dans tout système de distribution de vapeur desservant des appareils il est estimé que jusqu'à 25% des purgeurs peuvent présenter des fuites lorsqu'il n'y a pas de programme efficace de maintenance préventive comprennant l'entretien régulier des purgeurs. En considérant la quantité de vapeur ainsi perdue, il est évident que la maintenance des purgeurs est un travail rentable. Cependant, déterminer la présence d'une fuite n'est pas chose facile.

Prenons l'exemple d'un purgeur qui évacue le condensat à l'atmosphère. L'évacuation de condensat est continue s'il s'agit d'un purgeur thermostatique (à soufflet ou à bilame), et intermittente s'il s'agit d'un purgeur à flotteur inversé ouvert ou à disque. Du fait que le purgeur évacue à l'atmosphère, une partie du condensat se transforme en vapeur instantanée . Il est alors très difficile de savoir si la vapeur provient du condensat ou d'une fuite du purgeur. Si la vapeur s'échappe de façon continue sous la forme d'un jet de vapeur «bleu», il s'agit d'une fuite. Si la vapeur s'échappe de façon intermittente sous la forme d'un «nuage blanchâtre», c'est seulement de la vapeur instantanée.

Malheureusement, la vapeur n'est pas visible si le purgeur se vidange dans un système de collecte de condensat. Dans ce cas, trois méthodes sont disponibles pour discerner les fuites d'un purgeur.

- Utiliser un appareil d'écoute ou une tige d'acier qu'on tient à l'oreille, et écouter le bruit que fait la conduite d'évacuation du purgeur. Une évacuation continue se reconnaît normalement par le bruit que fait la vapeur qui traverse le purgeur à grande vitesse. Ce procédé exige de l'expérience, et il est parfois inadéquat dans les zones très bruyantes. Le stéthoscope est un appareil d'écoute couramment employé à cette fin.
- À l'aide d'un pyromètre, mesurer la température de la conduite à l'entrée du purgeur et à sa sortie. Il y a lieu de croire que le purgeur laisse s'échapper de la vapeur si la température de la conduite d'évacuation est presque aussi élevée qu'à l'entrée.
- Poser des voyants de verre sur la conduite d'évacuation du purgeur et observer directement le courant d'évacuation du purgeur. *De grandes précautions s'imposent car le verre peut s'éroder avec le temps et présenter un risque d'éclatement.*

De plus amples détails sur les purgeurs sont présentés dans le Module 8 — Systèmes à vapeur et à condensat.

Fuites de vapeur

Les fuites de vapeur sont une autre source importante de gaspillage d'énergie et d'argent. Le tableau 3 montre la quantité de vapeur perdue par mois selon les ouvertures de différentes dimensions et sous diverses pressions, lorsque la vapeur fuit à l'atmosphère.

Sur une tuyauterie bien isolée, les fuites de vapeur peuvent être difficiles à localiser. Les indices révélateurs sont un isolant détrempé, des gouttes d'eau qui coulent des revêtements isolants, et, bien sûr, un jet visible de vapeur. Dans la plupart des cas, les fuites se produisent aux robinets ou aux joints à brides d'une tuyauterie, elles peuvent être corrigées en resserrant un raccord boulonné, en remplaçant un joint étanche, ou en renouvelant l'étoupe d'étanchéité d'un robinet.

La feuille de travail 9-2 permet de calculer le coût des pertes de vapeur dues à des fuites.

Vapeur instantanée et coup de bélier

Lorsqu'un condensat chaud sous pression est envoyé dans une conduite de retour à basse pression, il entre immédiatement en ébullition. La vapeur formée par ce phénomène de vaporisation subite est dite vapeur instantanée. Plus le condensat est chaud ou plus la conduite d'évacuation est froide, plus le taux de vaporisation est important. La formation de vapeur instantanée peut être très intense si le condensat provient d'une vapeur haute pression. Puisqu'une partie seulement du condensat est vaporisée, il existe un risque que la vapeur formée déplace le condensat dans la tuyauterie pour créer des «masses liquides». Ces masses de condensat parcourent la tuyauterie en produisant des coups de bélier qui peuvent endommager la tuyauterie, les raccords, les régulateurs et les appareils. Ce phénomène de «coup de bélier» se produit lorsque des masses d'eau rencontrent des obstacles sur leur parcours. Le Module 8 — Systèmes à vapeur et à condensat élabore la méthode de calcul des quantités de vapeur instantanée.

Séparateurs de vapeur

Dans les réseaux de distribution de vapeur, des séparateurs enlèvent le condensat de la vapeur. Généralement, les séparateurs sont installés en amont des appareils exigeant de la vapeur sèche, ou dans un circuit secondaire de distribution de vapeur où pourraient exister des pourcentages relativement élevés de condensat entraîné. L'échange de chaleur s'effectuant dans les diverses pièces d'équipement est amélioré si le condensat est complètement éliminé du réseau de distribution de vapeur.

Perte de vapeur dans l'atmosphère

Feuille de travail 9-2

Entreprise: COMPAGNIE XYZ LTÉE Date: 20 FÉVRIER 1986

Endroit: ANYTOWN Par: MBE

Appareil: ÉCHANGEUR DE CHALEUR

Diamètre estimé de la fuite: 2,38 mm

Pression de vapeur: 689 kPa(effectifs)

Perte de vapeur: 13,47 kg/h (Table 3)

Durée de service: Nombre d'heures par jour: 24

Nombre de jours par semaine: 7

Nombre de semains par année: 52

Coût de la vapeur: 22 $/1000 kg (A obtenir de l'opérateur du générateur de vapeur)

Vapeur perdue = 13,47 kg/h x 24 h/jour x 7 jours/sem. x 52 sem./an

= 117 674 kg/an

Économies potentielles en dollars:

= 117 674 kg/an x 22 $/1000 kg

= 2 589 $ par année

Capacité d'extraction du condensat

Il est très important que le purgeur puisse enlever le condensat se formant lors du démarrage à froid et en marche normale. Lorsque la vapeur commence à circuler et que l'équipement est froid, le taux de formation du condensat est beaucoup plus élevé que lorsque l'équipement a atteint sa température normale de fonctionnement.

La capacité des purgeurs est déterminée en fonction de la quantité de condensat produite pendant la marche normale, et en utilisant un coefficient de sécurité pour la surproduction de condensat du démarrage. D'après les applications, le coefficient de sécurité se situe entre 2 et 10. Par exemple, un purgeur d'une capacité de 200 kg/h ne convient pas à un serpentin dont la capacité est de 200 kg/h sous une pression différentielle de 793 kPa, car lors de la mise en marche, le condensat pourrait se former à un taux plus rapide que 200 kg/h ou la pression différentielle pourrait baisser. Dans les deux cas, le serpentin serait inondé de condensat et l'échange de chaleur serait réduit. Les fabricants de purgeurs offrent une vaste documentation sur la capacité des purgeurs. Il est important de discuter avec les fournisseurs ou les fabricants de la méthode de calcul à employer selon les applications spécifiques.

Équation générale pour le calcul de l'échange de chaleur

L'équation générale pour le calcul de l'échange de chaleur est la suivante:

$$Q = U \times A \times DT$$

dans laquelle Q = taux de transfert de chaleur (watts)

U = coefficient global du transfert de chaleur [watts/($m^2 \cdot °C$)]

A = surface d'échange (m^2)

DT = différence de température entre le fluide chaud et le fluide froid (°C)

La figure 5 donne les valeurs du coefficient U pour certaines applications de chauffage et refroidissement. Pour des applications différentes d'autres tables plus complètes sont publiées.

APPLICATIONS DE CHAUFFAGE		COEFFICIENT DE SURFACE PROPRE		COEFFICIENTS DE CALCUL Tenant compte de l'encrassement normal	
CÔTÉ CHAUD	CÔTÉ FROID	Convection naturelle	Convection forcée	Convection naturelle	Convection forcée
1 Vapeur	Solution acqueuse	250-500	300-550	100-200	150-275
2 Vapeur	Huile légère	50- 70	110-140	40- 45	60-110
3 Vapeur	Huile de graissage moyenne	40- 60	100-130	25- 40	50-100
3 Vapeur	Mazout lourd (#6)	20- 40	70- 90	10- 30	60- 80
5 Vapeur	Goudron ou asphalte	15- 35	50- 70	15- 25	40- 60
6 Vapeur	Soufre fondu	35- 45	60- 80	4- 15	50- 70
7 Vapeur	Paraffine fondue	35- 45	45- 55	25- 35	40- 50
8 Vapeur	Air ou gaz	2- 4	5- 10	1- 3	4- 8
9 Vapeur	Mélasse ou sirop de maïs	20- 40	70- 90	15- 30	60- 80
10 Eau chaude à haute température	Solution acqueuse	80-100	100-225	70-100	110-160
11 Huile thermique à haute température	Goudron et asphalte	12- 30	45- 65	10- 20	30- 50
12 Therminol	Goudron et asphalte	15- 30	50- 60	12- 20	30- 50
APPLICATIONS DE REFROIDISSEMENT					
CÔTÉ FROID	CÔTÉ CHAUD				
13 Eau	Solution acqueuse	80-100	150-200	65-125	105-200
14 Eau	Huile de refroidissement	10- 15	25- 45	7- 10	15- 25
15 Eau	Huile de graissage moyenne	8- 12	20- 30	5- 8	10- 20
16 Eau	Mélasse ou sirop de maïs	7- 10	18- 26	4- 7	8- 15
17 Eau	Air ou gaz	2- 4	5- 10	1- 3	4- 8
18 Fréon ou ammoniaque (dilatation directe)	Solution acqueuse	35- 45	60- 90	20- 35	40- 60
19 Saumure de calcium ou de Sodium	Solution acqueuse	100-120	175-200	50- 75	80-125

Coefficient de transmission thermique totale moyenne
$U = BTU/(h \cdot pi^2 \cdot °F)$

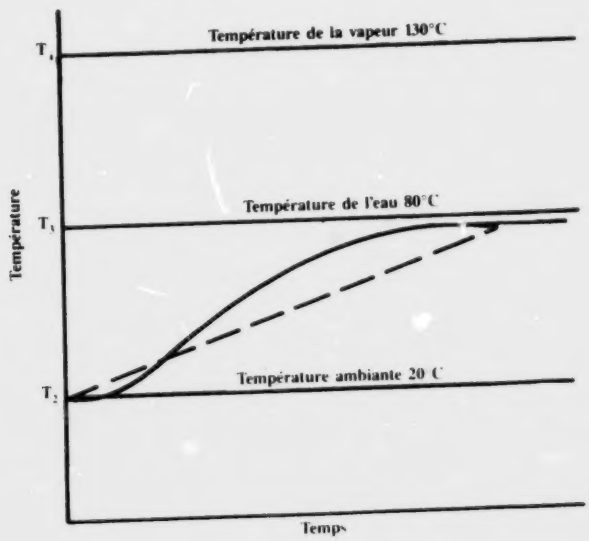
Note: 1 $Btu/(h \cdot ft^2 \cdot °F) = 5{,}68\ w/(m^2 \cdot °C)$

Figure 5

Écart logarithmique moyen de température (LMTD)

Dans tout calcul de l'échange de chaleur aux fins de chauffage, il est important de bien comprendre la notion d'écart de température. Considérons le chauffage d'un réservoir avec un serpentin de vapeur immergé dans l'eau (figure 6). L'eau doit passer de la température ambiante de 20°C à 80°C par la vapeur à une pression de 172,25 kPa (eff.) et à une température de 130°C.

Selon la figure 6 l'écart de température disponible au début du processus est $T_1 - T_2 = 130°C - 20°C = 110°C$. À mesure que l'eau se réchauffe, cet écart diminue jusqu'à ce que la température de l'eau atteigne 80°C, et l'écart devient $T_1 - T_3 = 130°C - 80°C = 50°C$. Il faut alors déterminer l'écart de température moyen DT qui peut être employé pour tout le cycle de chauffage. Si la température de l'eau augmentait à un taux uniforme, ce à quoi correspond la droite en pointillés, l'écart moyen serait la moyenne arithmétique des écarts de température existant au début et à la fin du chauffage.



Courbe type de chauffage
Figure 6

$$\text{Moyenne arithmétique} = \frac{(T_1 - T_2) + (T_1 - T_3)}{2} = \frac{110°C + 50°C}{2}$$

$$= 80°C$$

Cependant, la courbe de chauffage normale est représentée par la ligne continue. Pour un calcul plus précis, il faut employer l'écart logarithmique moyen de température (LMTD). À partir du même exemple, l'équation utilisée est la suivante:

$$LMTD = \frac{DT_1 - DT_2}{\ln\left(\frac{DT_1}{DT_2}\right)}$$

dans laquelle LMTD = écart logarithmique moyen de température (°C)

DT_1 = le plus grand écart de température entre le fluide chaud et le fluide froid (°C)

DT_2 = le plus petit écart de température entre le fluide chaud et le fluide froid (°C)

La feuille de travail 9-3 permet de faire un tel calcul, et elle a été utilisée à l'exemple précédent. La valeur ainsi calculée doit être employée comme DT dans la formule

$$Q = U \times A \times DT$$

L'écart logarithmique moyen de température (table 4) a été établi d'après l'équation ci-dessus pour des valeurs de T_1 situées entre 0°C et 400°C, et de T_2 entre 5°C et 240°C. Pour des valeurs en dehors de cette gamme, utiliser l'équation pour fin de calcul.

Effet de l'isolant sur le transfert de chaleur

La quantité de chaleur nécessaire au chauffage est la chaleur fournie au corps pour obtenir la température désirée plus la chaleur perdue à l'atmosphère. Par exemple, pour le chauffage d'un réservoir de stockage, la chaleur totale nécessaire est la somme de la chaleur nécessaire pour élever le produit emmagasiné à la température voulue et de la chaleur dissipée dans l'atmosphère par les parois du réservoir et la surface du liquide. Si l'appareil de chauffage a pour seul rôle de maintenir le produit stocké à la même température d'entrée, la chaleur fournie doit seulement être égale à la chaleur perdue. L'installation d'un isolant sur la surface extérieure du réservoir réduit le taux de perte de chaleur à l'atmosphère puisque dans l'équation $Q = U \times A \times DT$, la valeur de U est moindre, ce qui fait diminuer la valeur de Q.

La chaleur perdue par les équipements et tuyauteries isolés peut être calculée à l'aide des tableaux 5 et 6, et des feuilles de travail 9-4 et 9-5. La réduction des pertes de chaleur par l'application d'un isolant est traitée dans le Module 1 — Isolation thermique des équipements.

Des exemples de l'emploi des feuilles de travail 9-4 et 9-5 sont donnés ci-dessous.

Effet des mouvements de l'air sur le transfert de chaleur

Les mouvements d'air à la surface extérieure d'un réservoir ou d'un appareil ont pour effet d'augmenter le taux de perte de chaleur à l'atmosphère. En l'absence de vent, le gradient de température existant autour de la surface extérieure est considéré en régime stable. Quand le vent déplace l'air environnant, l'écart de température n'est plus en régime stable et la chaleur dissipée augmente.

Les valeurs des coefficients de transfert de chaleur «U» pour divers différentiels de température et vitesses de vent sont disponibles dans plusieurs publications, qu'il est recommandé de consulter pour fin de calculs.

Calcul de l'écart logarithmique moyen de température (LMTD)

Feuille de travail 9-3

Entreprise: COMPAGNIE XYZ LTÉE Date: 20 FÉVRIER 1985

Endroit: ANYTOWN Par: MBE

Utilisation du chauffage

Température initiale du liquide (T_2) 20 °C

Température finale du liquide (T_3) 80 °C

Température de la vapeur (T_1) 130 °C

Plus grand écart de température (DT_1)

$= T_1 - T_2$

$= 130 - 20$

$= 110$ °C

Plus petit écart de température (DT_2)

$= T_1 - T_3$

$130 - 80$

$= 50$ °C

LMTD

$$= \frac{DT_1 - DT_2}{\ln\left(\frac{DT_1}{DT_2}\right)}$$

$$= \frac{110 - 50}{\ln \frac{110}{50}}$$

ou, $$= \frac{60}{2{,}306 \log 2.2}$$

$$= \frac{60}{0{,}79}$$

$= 75{,}95$ °C

Pertes de chaleur par la tuyauterie

Feuille de travail 9-4

Entreprise: COMPAGNIE XYZ LTÉE Date: 20 FÉVRIER 1985

Endroit: ANYTOWN Par: MBE

Diamètre de conduite: 4 NPS Longueur de conduite: 100 m

Température de conduite: 150 °C Heures de service par année: 8 760

Type d'isolant proposé: FIBRE DE VERRE Épaisseur proposée: 51 mm

	Sans isolant	Avec isolant
Perte de chaleur par mètre:	725 W/(m·h)(Table 6)	57 W/(m·h)(Module 1)
Perte de chaleur totale par heure: (Perte de chaleur/mètre) x longueur	725 x 100 = 72 500 W/h	57 x 100 = 5 700 W/h
Perte de chaleur annuelle: Perte de chaleur/h x h/an	72 500 x 8 760 = 635 100 000 W/an (1)	5 700 x 8 760 = 49 932 000 W/an (2)

Diminution des pertes de chaleur grâce à la pose d'un isolant

= (1) − (2)

= 635 100 000 − 49 932 000

= 585 168 000 W/an

ou 585 168 000 W/an x 3.6 kJ/W

= 2 106 604 800 kJ/an

Les économies annuelles peuvent alors être calculées en dollars en employant le coût par unité de combustible. S'assurer que les unités de calcul sont compatibles.

Pertes de chaleur par les appareils

Feuille de travail 9-5

Entreprise: COMPAGNIE XYZ LTÉE Date: 20 FEVRIER 1985

Endroit: ANYTOWN Par: MBE

Appareil: RÉSERVOIR D'EAU # 2 Heures de service par année: 2 688

Superficie: 21,600 m² Type d'isolant proposé: FIBRE DE VERRE

Température du produit: 80 °C Épaisseur d'isolant proposée: 51 mm

Sans isolant	Avec isolant
Perte de chaleur: = 750 Wh/m²(Table 5)	33,3 Wh/m²(Module 1)
Perte de chaleur totale per heure: Superficie x perte de chaleur	Superficie x perte de chaleur
21,206 x 750	21,206 x 33,3
15 905 W/h	706 W/h
Perte de chaleur annuelle: Perte de chaleur/h x h/an	Perte de chaleur/h x h/an
15 905 x 2 688	706 x 2 688
42,8 x 10⁶ W/an (1)	1,9 x 10⁶ W/an (2)

Diminution des pertes de chaleur grâce à la pose d'un isolant

= (1) − (2)

= 42,8 x 10⁶ − 1,9 x 10⁶

= 40,9 x 10⁶ W/an

ou 40,9 x 10⁶ W/an x 3,6 kJ/W

= 147 x 10⁶ kJ/an

Les économies annuelles peuvent alors être calculées en dollars en employant le coût par unité de combustible. S'assurer que les unités de calcul sont compatibles.

Chauffage à la vapeur

Normalement, c'est la vapeur saturée qui est employée pour le chauffage. La vapeur à basse pression autrefois très employée dans les locomotives à vapeur, les marteaux-pilons à vapeur et les machines à vapeur n'est plus que rarement employé et ne sera pas traité dans le présent module.

Les appareils de chauffage à la vapeur agissent de deux façons: par chauffage direct et par chauffage indirect.

Avec le chauffage direct, le produit ou la matière à chauffer est en contact direct avec la vapeur et, dans la plupart des cas, il n'y a aucune récupération de condensat. Par exemple, un liquide peut être chauffé en y injectant directement de la vapeur. La vapeur et le condensat se mélangent au produit. Si ce procédé est employé pour chauffer une solution aqueuse, il faut tenir compte du fait que le condensat provoquera une certaine dilution et peut entraîner des solides en suspension.

Dans le chauffage indirect, la vapeur n'est pas en contact avec le produit. Dans la plupart des cas, le condensat de la vapeur est récupéré et retourné à la chaudière ou dans d'autres applications nécessitant de l'eau chaude. Le chauffage indirect est employé notamment, dans les cas suivants:

- dans un échangeur de chaleur vapeur-liquide
- pour le chauffage du contenu d'un réservoir de stockage
- pour le chauffage ambiant.

Il est à noter qu'il existe des cas de chauffage indirect où le condensat n'est pas récupéré. Prenons l'exemple du chauffage d'huile végétale ou de glucose dans des échangeurs de chaleur, où une défaillance de l'échangeur de chaleur pourrait avoir pour conséquence que la matière chauffée se mêle au condensat. Si ce condensat était récupéré pour réutiliser comme eau d'alimentation de chaudière, la matière mêlée au condensat contaminerait les surfaces d'échange à l'intérieur de la chaudière. Il en résulterait une baisse du rendement de la chaudière et, dans les cas extrêmes, un risque d'explosion de la chaudière. Par conséquent, chaque application doit être étudiée individuellement. Si le condensat ne peut pas être réutilisé, il est recommandé d'étudier la possibilité d'utiliser la chaleur du condensat.

Chauffage direct à la vapeur

Dans la plupart des processus de chauffage direct par la vapeur, la matière à chauffer est contenue dans un appareil fonctionnant à la pression atmosphérique. La température maximale à laquelle le liquide peut être porté est son point d'ébullition. L'apport supplémentaire de vapeur à un liquide en ébullition ne peut produire aucune augmentation de température.

L'emploi de la vapeur dans des processus de chauffage implique certaines considérations théoriques et pratiques. Commençons par les principes théoriques du chauffage direct par la vapeur.

M = poids du liquide (kg)

c = chaleur spécifique du liquide [kJ/(kg·°C)]

T_1 = temperature du liquide à chauffer (°C)

T_2 = température finale du liquide chauffé (°C)

w = débit de vapeur (kg/h)

h_g = enthalpie de la vapeur, (kJ/kg)

t = temps nécessaire pour atteindre la température T_2 en minutes

h_f = enthalpie de l'eau à la température T_2, (kJ/kg)

Q_1 = quantité de perte de chaleur à l'atmosphère [kJ/(°C·s)]

Q_2 = quantité de chaleur transportée par la vapeur perdue [kJ/(°C·s)]

$$\text{Chaleur appliquée à l'appareil (kJ)} = \frac{w}{60} \times (h_g - h_f) \times t$$

$$\text{Perte de chaleur par l'appareil (kJ)} = (Q_1 + Q_2) \times 60 \times t \times \frac{(T_2 - T_1)}{2}$$

$$\text{Gain de chaleur du liquide (kJ)} = (T_2 - T_1) \times M \times c$$

Gain de chaleur = chaleur appliquée — perte de chaleur

$$(T_2 - T_1) \times M \times c = \frac{w}{60} \times (h_g - h_f) \times t - \left[(Q_1 + Q_2) \times 60 \times t \times \frac{(T_2 - T_1)}{2} \right]$$

Toutes les valeurs considérées dans l'équation précédente sauf Q_1 et Q_2 peuvent être déterminées à l'aide d'instruments de mesure ordinaires et des constantes physiques publiées dans les manuels. Les méthodes théoriques de détermination de $Q_1 + Q_2$ dépassent la portée du présent module, et c'est pourquoi une méthode empirique est décrite ci-après.

Pour déterminer la quantité de perte de chaleur à l'atmosphère par un réservoir chauffé, on augmente la température du réservoir et de son contenu à une température située à mi-chemin entre T_1 et T_2, puis on arrête le chauffage, et finalement on mesure la diminution de la température sur une certaine période de temps.

Perte de chaleur à l'atmosphère + perte de chaleur par évaporation = perte de chaleur par le liquide.

DT = baisse de température (°C)

t = temps pour que la baisse de température mesurée se produise (minutes)

Perte de chaleur (en kJ) = DT × M × c

$$\text{Taux de perte de chaleur à l'atmosphère et par évaporation (kJ/min)} = Q_1 + Q_2 = \frac{DT \times M \times c}{t}$$

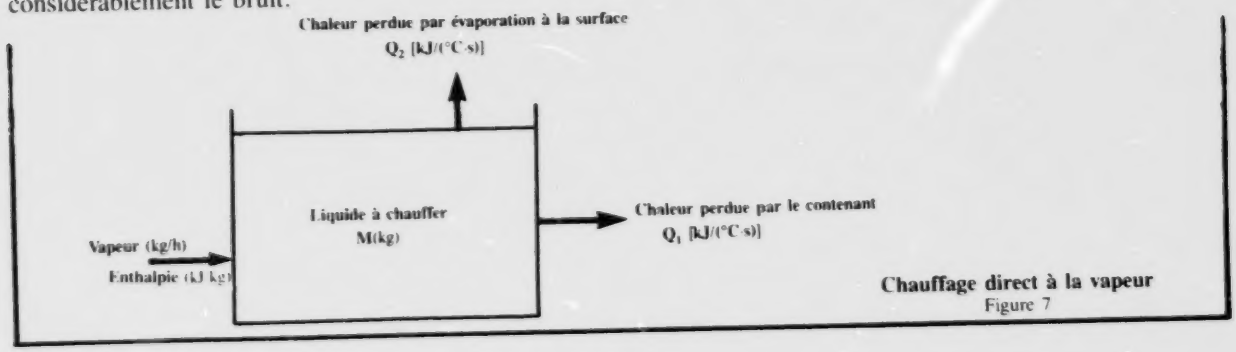
Cette méthode n'est pas valable si le liquide est en ébullition, ou si l'application initiale du chauffage comprend une matière gelée.

Considérations pratiques sur le chauffage direct à la vapeur

Le chauffage direct à la vapeur est économique et rapide, mais il peut s'avérer très dangereux si des mesures adéquates ne sont pas prises. Plusieurs mesures de sécurité s'imposent.

- L'appareil doit être conçu pour les conditions de vapeur prévues et convenablement ventilé. De la chaleur sera perdue dans la vapeur, mais toute tentative de fermer l'appareil pourrait occasionner une montée excessive de pression.
- Ne jamais tenter de chauffer un liquide à l'aide d'un boyau ou d'un tube d'injection de vapeur car le boyau ou le tube pourrait se mettre à fouetter dangereusement.
- Être des plus prudents s'il s'agit de chauffer à la vapeur une matière autre que des solutions aqueuses.
- Arrêter le chauffage dès que le point d'ébullition est atteint.

Le chauffage direct à la vapeur est un processus bruyant. Le bruit vient des bulles de vapeur formées dans le liquide qui s'écrasent subitement. L'emploi de robinets et d'éjecteurs qui mélangent et agitent le liquide réduit considérablement le bruit.

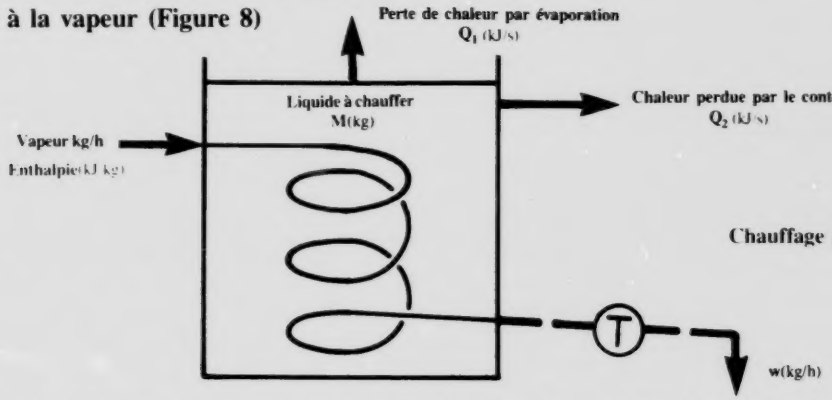


Chauffage direct à la vapeur
Figure 7

Chauffage indirect à la vapeur

Les trois grandes catégories d'appareils de chauffage indirect à vapeur sont les serpentins à vapeur, les vaisseaux à enveloppe chauffante, et les échangeurs de chaleur. Avec les vaisseaux à enveloppe chauffante et les serpentins à vapeur, le liquide chauffé ne circule normalement pas. Dans les échangeurs de chaleur, par contre, la vapeur et le liquide sont tous les deux en circulation.

Serpentins à la vapeur (Figure 8)



Chauffage par serpentin de vapeur
Figure 8

Les données nécessaires pour calculer la perte de chaleur dans le chauffage par serpentins de vapeur sont les suivantes:

w = débit de vapeur (kg/h)

h_g = enthalpie de la vapeur (kJ/kg)

h_f = enthalpie du condensat récupéré (kJ/kg)

M = poids du liquide dans le réservoir (kg)

c = chaleur spécifique du liquide (kJ/kg·°C)

Q_1 = perte de chaleur par évaporation (kJ/s)

Q_2 = perte de chaleur à l'atmosphère (kJ/s)

T_1 = température du liquide à chauffer (°C)

T_2 = température finale du liquide chauffé (°C)

t = temps nécessaire pour amener le liquide à T_2(s)

3600 = coefficient de conversion, heures à secondes

$$\text{Chaleur fournie(kJ)} = \frac{w}{3600} \times t \times (h_g - h_f)$$

$$\text{Gain de chaleur (kJ)} = M \times (T_2 - T_1) \times c$$

$$\text{Perte de chaleur (kJ)} = (Q_1 + Q_2) \times t$$

Chaleur fournie = gain de chaleur + perte de chaleur

$$\frac{w}{3\,600} \times t \times (h_g - h_f) = [M \times (T_2 - T_1) \times c] + [(Q_1 + Q_2) \times t]$$

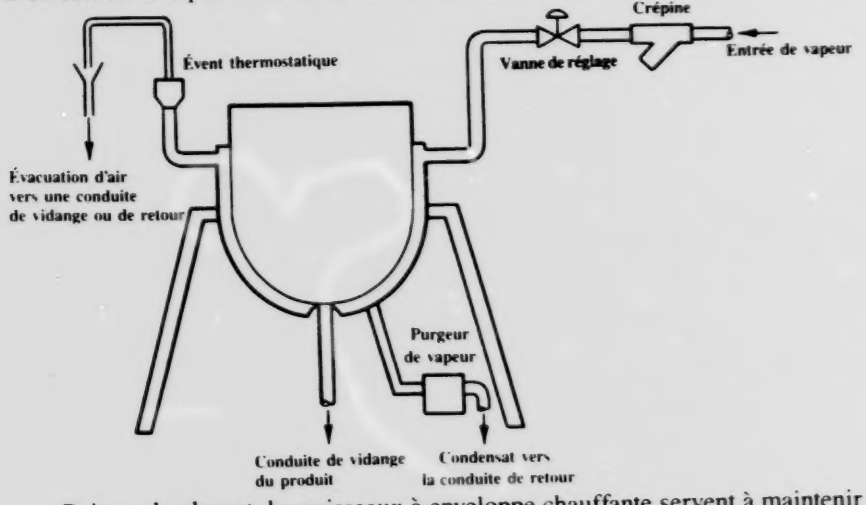
Toutes les valeurs sauf ($Q_1 + Q_2$) peuvent être déterminées à l'aide d'instruments de mesure et des tables. La valeur de ($Q_1 + Q_2$) peut être déterminée de façon empirique par la méthode décrite pour le chauffage indirect, mais quelques précautions s'imposent:

- L'échantillonnage de température obtenu alors que le liquide est proche de son point d'ébullition n'est pas valable à cause de la perte excessive de chaleur qui se produit par évaporation.
- L'échantillonnage doit être pris pendant que l'appareil est rempli plus qu'à moitié, afin que la perte de chaleur à l'atmosphère (Q_2) ne soit pas sous-estimée.
- Il faut mesurer la température du condensat avant qu'il atteigne le purgeur.

Vaisseaux à enveloppe chauffante

Un vaisseau à enveloppe chauffante comporte une paroi intérieure et une paroi extérieure. L'espace entre les parois est rempli de vapeur qui chauffe le contenu de l'appareil. Ce genre d'appareil est employé pour chauffer et maintenir un produit à une température déterminée, comme pour la cuisson de soupes et de confitures.

Les vaisseaux à enveloppe chauffante sont des appareils sous pression et, à ce titre, ils doivent être conçus et construits conformément aux codes en vigueur. Il est important de noter que la surface extérieure d'un vaisseau à enveloppe chauffante s'approche de la température de la vapeur et doit être soigneusement isolée. Autrement, il en résulte une perte excessive de chaleur et un risque de brûlures pour le personnel.



Vaisseau à enveloppe chauffante
Figure 9

Puisque la plupart des vaisseaux à enveloppe chauffante servent à maintenir une substance à des températures élevées pendant de longues périodes de temps, l'analyse théorique d'une telle application est donnée ci-après.

w = débit de vapeur (kg/h)

h_g = enthalpie de la vapeur (kJ/kg)

h_f = enthalpie du condensat (kJ/kg)

M_1 = poids du produit à l'entrée (kg)

M_2 = poids du produit à la sortie (kg)

Q_2 = perte de chaleur à l'atmosphère par la surface de l'appareil (kJ/s)

t = durée du chauffage (s)

3 600 = coefficient de conversion, heures à secondes

Prenons comme hypothèse que la température du produit est proche de son point d'ébullition. Si elle ne l'était pas, la méthode empirique décrite pour les serpentins de vapeur conviendrait pour déterminer les diverses constantes.

$$\text{Chaleur fournie (kJ)} = \frac{W}{3\,600} \times t \times (h_g - h_f)$$

$$\text{Perte de chaleur à l'atmosphère (kJ)} = Q_2 \times t$$

$$\text{Perte de chaleur par ébullition (kJ)} = (M_1 - M_2) \times h_g$$

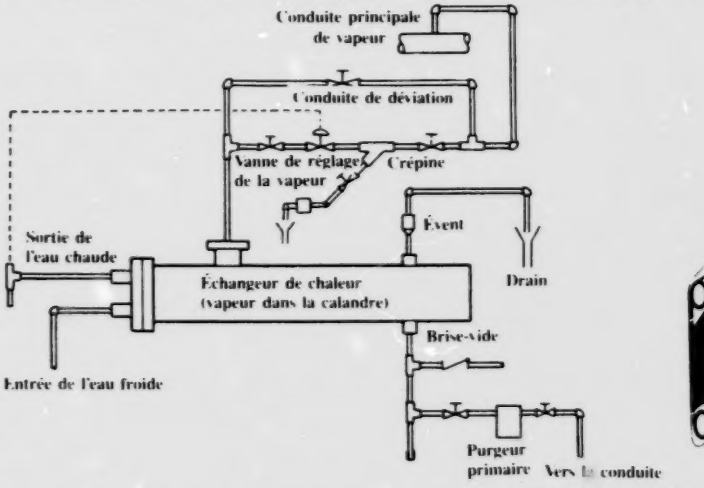
Chaleur fournie= perte par ébullition + perte à l'atmosphère

$$\frac{W}{3\,600} \times t \times (h_g - h_f) = [(M_1 - M_2) \times h_g] + (Q_2 \times t)$$

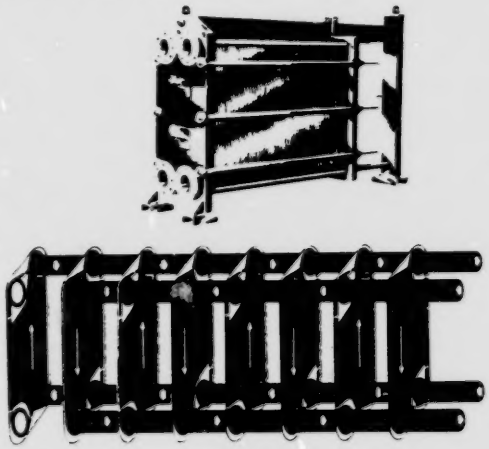
Pour déterminer la valeur de Q_2 au point d'ébullition, faire l'expérience décrite précédemment avec l'appareil rempli au 2/3 ou au 3/4, en employant une huile minérale ou végétale à plus haut point d'ébullition, et la chauffer jusqu'au point d'ébullition du produit à chauffer.

Échangeurs de chaleur

Aux fins du présent module, les types d'échangeurs de chaleur considérés sont les échangeurs à calandre et les échangeurs à plaques. Les échangeurs de chaleur sont utilisés pour chauffer ou refroidir un fluide en circulation. Lorsqu'on emploie un échangeur de chaleur, les conditions d'échange de chaleur sont stables. Avant d'étudier leur fonctionnement, les divers types d'appareils et leurs applications seront décrits.



Échangeur de chaleur type multitubulaire à calandre
Figure 10



Échangeur de chaleur à plaques
Figure 11

La plupart des échangeurs de chaleur comportent quatre raccords. Deux servent à la matière à traiter, et deux autres servent au fluide de chauffage ou de refroidissement. Les échangeurs de chaleur sont couramment employés dans les applications suivantes:

- pour chauffer un liquide par de la vapeur ou un liquide chaud,
- pour refroidir un liquide par un autre liquide,
- pour condenser de la vapeur par un liquide froid.

Dans un échangeur à calandre, il est recommandé que les deux fluides circulent à contre-courant pour réaliser le meilleur rendement de transfert de chaleur. Normalement, le fluide corrosif ou contenant le plus d'impuretés circule dans les tubes, pour que le côté calandre (l'enveloppe qui entoure les tubes) reste propre. Cela est simplement dû au fait qu'il est moins coûteux de fabriquer des tubes résistant à la corrosion.

Les convertisseurs employés pour le chauffage des bâtiments, dans lesquels la vapeur chauffe l'eau, est un exemple courant d'un échangeur de chaleur.

La perte de chaleur à l'atmosphère par l'enveloppe d'un échangeur de chaleur est faible en comparaison du taux d'échange de chaleur qui se produit à l'intérieur, particulièrement si la calandre est isolée. En fait, si la calandre n'est pas isolée, il en résulte non seulement une perte de chaleur mais un risque de brûlure pour le personnel.

Considérons un échangeur de chaleur qui chauffe de l'eau à l'aide d'une vapeur saturée sèche.

w_1 = débit de vapeur (kg/h)

w_2 = débit d'eau (kg/h)

h_g = enthalpie de la vapeur (kJ/kg)

h_f = enthalpie du condensat (kJ/kg)

T_1 = température de l'eau à l'entrée (°C)

T_2 = température de l'eau à la sortie (°C)

Q = perte de chaleur à l'atmosphère (kJ/s)

3 600 = coefficient de conversion, heures à secondes

$$\text{Chaleur fournie (kJ/s)} = \frac{w_1}{3600} \times (h_g - h_f)$$

$$\text{Gain de chaleur (kJ/s)} = \frac{w_2}{3600} \times (T_2 - T_1) \times 4{,}1855$$

$$\text{Perte de chaleur (kJ/s)} = Q$$

Chaleur fournie = gain de chaleur + perte de chaleur

$$\frac{w_1}{3\,600} \times (h_g - h_f) = \left[\frac{w_2}{3\,600} \times (T_2 - T_1) \times 4{,}1855 \right] + Q$$

Comme il fut expliqué précédemment, Q sera très faible, mais la valeur peut être déterminée de façon empirique en procédant comme suit:

Laisser l'échangeur de chaleur fonctionner normalement jusqu'à ce que les conditions soient stables. Refermer la vanne d'entrée de la vapeur et la vanne de sortie de l'eau chaude. Laisser l'échangeur se refroidir pendant 5 minutes. Observer la température de l'eau. Rouvrir la vanne d'entrée de la vapeur et recueillir le condensat pendant les 10 minutes suivantes. Consigner la température de l'eau. La quantité moyenne de perte de chaleur à l'atmosphère peut alors être déterminée comme suit:

M_1 = poids du condensat recueilli en 10 minutes (kg)

M_2 = capacité du côté eau de l'échangeur de chaleur (kg)

M_3 = poids de l'échangeur de chaleur (kg)

c_1 = chaleur spécifique du matériau de l'échangeur de chaleur [kJ/(kg·°C)]

4,1855 = chaleur spécifique de l'eau [kJ/(kg·°C)]

T_1 = température de l'eau au commencement des 10 minutes de chauffage (°C)

T_2 = température de l'eau à la fin des 10 minutes de chauffage (°C)

$$\text{Chaleur fournie (kJ)} = (h_g - h_f) \times M_1$$

$$\text{Gain de chaleur en 10 minutes (kJ)} = [(M_2 \times 4{,}1855) + (M_3 \times c_1)] \times (T_2 - T_1)$$

$$\text{Perte de chaleur en 10 minutes (kJ)} = 10 \times Q$$

Chaleur fournie= gain de chaleur + perte de chaleur

$$(h_g - h_f) \times M_1 = [(M_2 \times 4{,}1855) + (M_3 \times c_1)] \times (T_2 - T_1) + 10 \times Q$$

Taux de perte de chaleur de l'échangeur (kJ/min) = Q

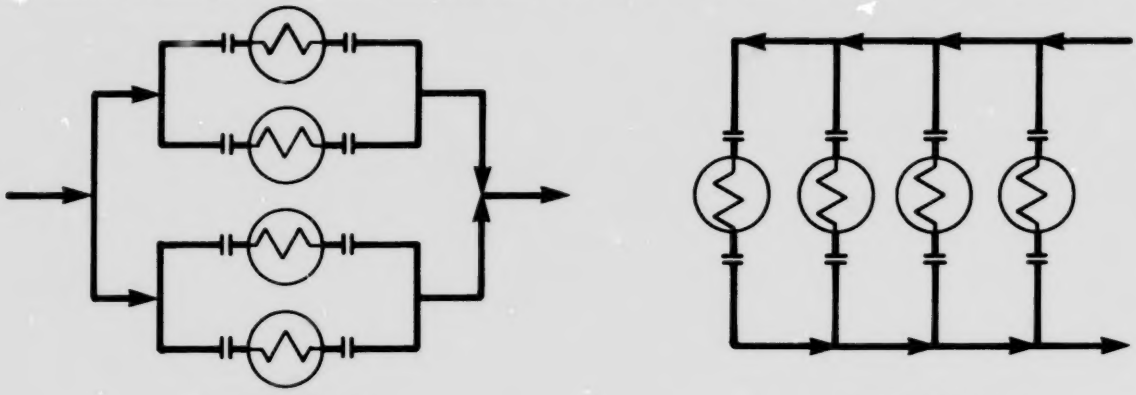
Il faut tenir compte de certaines considérations pratiques en employant cette méthode empirique:

- Le temps de refroidissement de 5 min et le temps de chauffage de 10 min sont approximatifs et doivent être établis d'après les conditions réelles. L'objectif est de garder l'augmentation de température entre 5 et 10°C.
- On suppose que la calandre et les tubes de l'échangeur de chaleur sont faits du même matériau. Si ce n'est pas le cas, il faut tenir compte du poids et de la chaleur spécifique de chacun des composants.

Rendement des échangeurs de chaleur

Le choix final du type et de la capacité d'un échangeur de chaleur s'effectuent avec l'aide du fabricant. Nous donnons ci-après quelques exemples d'installations d'échangeurs de chaleur correctement sélectionnés qui ne donnent pas un rendement satisfaisant.

- *Circulation incorrecte des fluides.* Il est important que les deux fluides circulent à contre-courant. Le fluide de chauffage doit entrer par le haut et sortir par le bas, alors que le fluide froid doit entrer par le bas et sortir par le haut. Tout écart de ces principes peut donner lieu à un mauvais rendement et à des accidents coûteux. Pour obtenir un bon rendement avec circulation à contre-courant, l'entrée de la vapeur et la sortie du fluide chaud doivent être situées à proximité.
- *Mauvaise disposition de la tuyauterie de connexion.* Il est courant de voir plusieurs échangeurs de chaleur disposés en parallèle. Dans ce cas, la distribution du fluide est importante. La tuyauterie doit être disposée de telle sorte que la résistance d'écoulement soit uniforme entre le collecteur et chacun des échangeurs. Cette exigence ne s'applique pas à l'alimentation de vapeur du fait que le principal facteur assurant la bonne circulation de la vapeur est la sortie du condensat et non la tuyauterie d'entrée. La figure 12 montre pour une batterie d'échangeurs de chaleur des exemples d'agencement adéquat et inadéquat de la tuyauterie.



Bonne disposition, hydrauliquement équilibrée, pour rendement maximal

Mauvaise disposition, hydrauliquement déséquilibreé, donne un rendement pauvre

Agencement de la tuyauterie pour un groupe d'échangeurs de chaleur
Figure 12

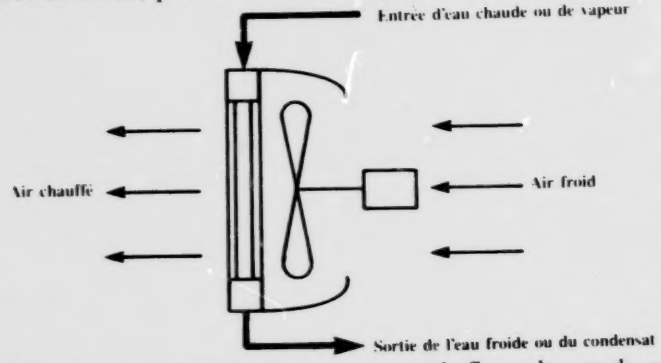
- *Mauvais arrangements des purgeurs.* Dans les échangeurs où la chaleur provient de la vapeur, il est important d'évacuer le condensat à mesure qu'il se forme pour éviter une accumulation à l'intérieur de l'échangeur. Le condensat étant un mauvais conducteur de chaleur il réduit considérablement le rendement du transfert de chaleur de l'échangeur. L'évacuation du condensat peut être affectée par des purgeurs défectueux ou d'une capacité insuffisante, par une contre-pression excessive aux purgeurs ou par une mauvaise disposition des purgeurs. Afin de vérifier l'évacuation du condensat, on ouvre avec précaution le robinet de vidange du purgeur; si une grande quantité de vapeur instantanée s'en échappe, cela confirme qu'il y a effectivement une accumulation de condensat.

- *Insuffisance du système d'évent*. Toute accumulation de gaz du côté vapeur ou calandre d'un échangeur nuit au rendement du transfert de chaleur. Les gaz dissous entraînés par la vapeur peuvent s'accumuler aux endroits les plus élevés pour réduire la conductivité thermique. Dans les petits échangeurs dont la tuyauterie est généralement de faible diamètre, cela ne se produit pas car les gaz sont entraînés par la vapeur. Dans les gros échangeurs, par contre, des évents manuels ou automatiques doivent être prévus aux endroits les plus élevés pour évacuer les gaz. Dans les condenseurs de vapeur où la pression de vapeur est inférieure à la pression atmosphérique, des éjecteurs mécaniques ou à vapeur sont prévus pour enlever les gaz présents dans la vapeur.
- *Encrassement et entartrage*. Les problèmes rencontrés le plus souvent dans les échangeurs de chaleur sont l'encrassement et l'entartrage, qui réduisent l'échange de chaleur et nuisent à l'écoulement des fluides. Le fluide qui est le plus susceptible d'encrasser ou d'entartrer les parois devrait circuler dans les tubes. La présence de dépôts est révélée par une diminution du rendement et du débit, ce qui peut être empêché par un traitement adéquat de l'eau. Des entreprises spécialisées pourront recommander le type de traitement requis.

  Dans certains cas, l'encrassement et l'entartrage ne peuvent pas être empêchés, et un nettoyage chimique et/ou mécanique est nécessaire. Les échangeurs devraient être disposés de telle façon que les collecteurs puissent être ouverts pour le nettoyage mécanique sans avoir à enlever d'autres appareils ou éléments de tuyauterie. Des nettoyages répétés ou un entartrage prononcé peuvent rendre nécessaire le remplacement d'un faisceau entier de tubes. En pareil cas, il faut enlever et remplacer complètement le faisceau de tubes et sa plaque tubulaire.
- *Fuites*. Lorsqu'un échangeur de chaleur s'est corrodé avec le temps, une fissure peut se produire entre la plaque tubulaire et le faisceau de tubes. Cela peut être difficile à déceler, surtout dans le cas d'un échangeur du type eau-eau ou eau-vapeur. Les fuites peuvent causer un problème de contamination. Pour éviter ce problème, le meilleur moyen est de maintenir le fluide propre à pression élevée, bien que cette solution ne soit pas toujours pratique. Il faut réparer l'échangeur ou remplacer ses tubes aussitôt qu'une fuite est décelée.

Aérothermes

Les aérothermes sont des échangeurs de chaleur qui enlèvent la chaleur contenue dans la vapeur ou l'eau chaude circulant dans des tubes de métal, pour réchauffer l'air pulsé sur les tubes (Figure 13).



Aérotherme type
Figure 13

Normalement, les tubes portent des ailettes ou traversent de fines plaques de métal pour augmenter la surface d'échange et le coefficient de transfert de chaleur. Un signal de basse température ambiante provenant d'un thermostat fait démarrer le ventilateur qui envoie de l'air sur les surfaces chaudes pour augmenter le transfert de chaleur. Lorsque le thermostat détecte que la température désirée est atteinte, il arrête le ventilateur.

Si l'aérotherme est chauffé à la vapeur, un purgeur commande le débit de vapeur et l'interrompt lorsque que l'extraction de la chaleur de la vapeur n'est plus nécessaire.

Dans la plupart des aérothermes chauffés à l'eau chaude, l'eau chaude circule constamment. Dans certains appareils récents de grande capacité chauffés à l'eau chaude, une électrovanne ferme l'entrée d'eau lorsque le ventilateur s'arrête.

Le mauvais fonctionnement d'un aérotherme peut être dû aux défauts suivants:

- mauvais fonctionnement du système de régulation
- mauvais fonctionnement des purgeurs
- poche d'air dans le circuit
- tubes corrodés et entartrés
- ailettes et extérieur des tubes empoussiérés ou encrassés
- mauvais fonctionnement du ventilateur et du moteur.

La théorie de fonctionnement des aérothermes est expliquée ci-après pour qu'on puisse mieux comprendre leurs applications et leurs modes d'emploi. L'exemple concerne un aérotherme chauffé à l'eau chaude.

fa = débit d'air (m^3/h)

v_g = volume spécifique de l'air (m^3/kg)

cp = chaleur spécifique de l'air à pression constante [kJ/(kg·°C)]

T_{A1} = température de l'air à l'entrée (°C)

T_{A2} = température de l'air à la sortie (°C)

w = débit d'eau (kg/h)

T_{W1} = température de l'eau à l'entrée (°C)

T_{W2} = température de l'eau à la sortie (°C)

Chaleur fournie (kJ/h) = $w \times (T_{W1} - T_{W2}) \times 4.1855$

$$\text{Gain de chaleur (kJ/h)} = \frac{fa}{v_g} \times cp \times (T_{A2} - T_{A1})$$

Chaleur fournie = gain de chaleur

$$w \times (T_{W1} - T_{W2}) \times 4.1855 = \frac{fa}{v} \times cp \times (T_{A2} - T_{A1})$$

Prenons l'exemple d'un aérotherme chauffé à la vapeur.

fa = débit d'air (m^3/h)

v_g = volume spécifique de l'air (m^3/kg)

cp = chaleur spécifique de l'air à pression constante [kJ/(kg·°C)]

T_{A1} = température de l'air à l'entrée (°C)

T_{A2} = température de l'air à la sortie (°C)

w = débit de vapeur = débit de condensat (kg/h)

h_g = enthalpie de la vapeur (kJ/kg)

h_f = enthalpie du condensat (kJ/kg)

Chaleur fournie (kJ/kg) = $w \times (h_g - h_f)$

$$\text{Gain de chaleur (kJ/h)} = \frac{fa}{v_g} \times cp \times (T_{A2} - T_{A1})$$

Chaleur fournie = gain de chaleur

$$w \times (h_g - h_f) = \frac{fa}{v_g} \times cp \times (T_{A2} - T_{A1})$$

De cette équation ou de l'équation précédente, il est possible de calculer la consommation de vapeur ou d'eau et le coût d'exploitation des aérothermes chauffés à la vapeur ou à l'eau chaude.

Équipements refroidis à l'eau

Les équipements refroidis à l'eau sont régis par les mêmes lois de thermodynamique et d'échange de chaleur que les équipements chauffés à la vapeur. L'énergie sous forme de chaleur se transmet d'un niveau de température élevé à un niveau de température plus bas. La gamme des températures de l'eau utilisée est limitée. À la pression atmosphérique, l'eau gèle à 0°C et bout à 100°C. La température normale de l'eau distribuée par les aqueducs municipaux peut varier entre 4°C et 10°C selon la saison. Si l'eau de l'aqueduc est utilisée pour refroidissement, ces variations de température doivent être prises en considération pour le choix d'un échangeur de chaleur, la pompe, la tuyauterie et les dispositifs de régulation. Le refroidissement à l'eau peut se faire de façon directe ou indirecte.

Refroidissement direct

Dans les applications de refroidissement direct, l'eau de refroidissement est amenée en contact direct avec la matière ou le produit à refroidir. Généralement, le refroidissement direct est utilisé pour des produits solides immergés dans un réservoir contenant l'eau ou passés dans un jet d'eau pulvérisée. Dans un tel processus, la température finale du produit ne doit pas être critique, de même que la quantité et la température de l'eau.

Une autre méthode de refroidissement direct est l'injection d'eau dans un produit aqueux, procédé qui refroidit et dilue le produit.

Refroidissement indirect

Le refroidissement indirect à l'eau est la méthode la plus couramment utilisée. L'eau de refroidissement et le produit à refroidir sont séparés par une membrane, et la transmission de la chaleur du produit vers l'eau de refroidissement s'effectue à travers cette membrane. Des exemples typiques de refroidissement indirect concernent les serpentins de refroidissement immergés dans les réservoirs contenant des liquides, les serpentins de refroidissement des appareils de refroidissement d'air, les échangeurs de chaleur et les vaisseaux à enveloppe chauffante.

Sources d'eau de refroidissement

L'eau de refroidissement peut provenir du réseau d'aqueduc municipal, de puits et de sources de surface tels que les lacs, étangs, rivières et ruisseaux. Dans bien des cas, l'eau est employée sans subir de traitement et elle ne passe qu'une fois dans le circuit, pour être évacuée ensuite dans le réseau d'égout municipal ou vers la source d'origine. En raison des variations de température de l'eau provenant de sources naturelles, il faut s'assurer, en choisissant le matériel de refroidissement, qu'il pourra supporter les variations de débit qui lui seront imposées pour obtenir les taux d'échange de chaleur nécessaires.

Dans un système en circuit fermé, l'eau de refroidissement est réutilisée en y ajoutant seulement de petites quantités d'eau d'appoint pour compenser les pertes dans le circuit. Généralement, ces systèmes sont équipés d'un dispositif quelconque d'évacuation de la chaleur tel qu'un bassin de refroidissement par évaporation, une tour de refroidissement ou un refroidisseur qui rejette la chaleur contenue dans l'eau et ramène cette eau à la température requise au processus de refroidissement. Normalement, ces systèmes emploient une certaine forme de traitement chimique pour éliminer ou réduire le plus possible, les problèmes d'encrassement ou d'entartrage provoqués par les impuretés contenues dans l'eau. Plus de détails sur les tours de refroidissement et les refroidisseurs sont contenus dans le Module 11 — Refroidissement et pompes à chaleur.

Transfert de la chaleur

En théorie, il devrait être possible de refroidir 10 L/s d'un produit devant passer de 30°C à 25°C, en utilisant un débit de 10 L/s d'eau de refroidissement à 20°C réchauffée jusqu'à 25°C. En pratique, cependant, cela n'est pas possible à cause des limitations physiques de la capacité des équipements, de la diminution de l'échange de chaleur due à l'entartrage, et de l'apport de chaleur provenant de l'atmosphère. Il est donc convenu d'accepter pour un échangeur de chaleur un écart de température d'approche de 3°C à 5°C entre l'eau de refroidissement et le fluide à refroidir, à la fin de l'échange.

L'équation suivante peut être employée pour calculer la quantité approximative de chaleur cédée ou absorbée dans un écoulement d'eau.

$$Q = fw \times (T_1 - T_2) \times 15$$

où Q = chaleur totale transmise (MJ/h)

fw = débit d'eau (L/s)

T_1 = température de l'eau à l'entrée (°C)

T_2 = température de l'eau à la sortie (°C)

15 = facteur multiplicateur tenant compte de la chaleur spécifique de l'eau et de la conversion des unités.

Par exemple, un produit circulant à 5 L/s entre dans un échangeur de chaleur à 30°C et en sort à 25°C. La chaleur cédée se calcule comme suit:

$$Q = fw \times (T_1 - T_2) \times 15$$

$$= 5 \times (30 - 25) \times 15$$

$$= 5 \times 5 \times 15$$

$$= 375 \text{ MJ/h}$$

Si le rendement du transfert de chaleur de l'échangeur est de 100%, l'eau de refroidissement doit donc absorber une énergie de 375 MJ/h. Un rendement réaliste pour un échangeur de chaleur étant de 85%, le débit de l'eau de refroidissement doit être ajusté pour pouvoir absorber $375 \div 0{,}85 = 441{,}18$ MJ/h.

Si la température d'entrée de l'eau de refroidissement est de 15°C et qu'on emploie un écart de température d'approche de 5°C:

$$441{,}18 = fw \times (15 - 20) \times 15$$

$$441{,}18 = fw \times (-5) \times 15$$

$$441{,}18 = -75 \text{ fw}$$

$$fw = \frac{441{,}18}{-75}$$

$$= -5{,}88 \text{ L/s}$$

Le signe négatif peut être négligé car il indique seulement que la chaleur est absorbée par l'eau de refroidissement.

En conclusion, il faudra appliquer un débit de 5,88 L/s d'eau de refroidissement à 15°C lorsque sa température monte à 20°C, pour faire passer 5 L/s de produit de 30°C à 25°C dans un échangeur dont le rendement est de 85%.

Analyse énergétique

Diverses possibilités de gestion de l'énergie existent dans les appareils de chauffage et de refroidissement (vapeur et eau) dans les installations industrielles, bâtiments commerciaux et immeubles de caractère public. De nombreuses possibilités peuvent être identifiées lors d'une analyse au passage. Une telle analyse est généralement plus révélatrice si elle est effectuée par une personne de l'extérieur ayant une connaissance générale des principes de gestion de l'énergie. Les possibilités d'économies d'énergie typiques relevées pendant une analyse au passage sont: les fuites de vapeur aux raccords, les fuites d'eau, ou des avaries à l'isolant. La vigilance du personnel de gestion et du personnel d'exploitation impliqué dans un programme d'entretien préventif efficace peuvent réduire sensiblement les consommations d'énergie et les coûts d'exploitation.

Tous les items relevés au cours d'une analyse au passage ne sont pas aussi faciles à analyser que ceux déjà décrits. Par exemple, on peut noter que de l'eau de refroidissement est évacué directement à l'égout. Or, cette eau peut contenir une certaine énergie calorifique, et il faut analyser avec soin s'il serait rentable d'en récupérer la chaleur. Cela soulève les questions suivantes:

- Quelle quantité de chaleur contient l'eau rejetée?
- Est-il possible d'utiliser cette chaleur?
- Quelle est l'investissement nécessaire pour récupérer cette chaleur?
- Les économies d'énergie et les dépenses s'y rattachant seront-elles suffisantes pour compenser l'achat de l'équipement de récupération de chaleur?

Une analyse de diagnostic est nécessaire pour déterminer mathématiquement la quantité de chaleur contenue dans l'eau rejetée, quelle quantité d'énergie peut être récupérée et s'il y a un emploi possible pour cette énergie récupérée. C'est la quantité d'énergie récupérable et réutilisable qui définit les économies monétaires. À partir de cette donnée, et après avoir déterminé le coût estimé d'achat et d'installation de l'équipement de récupération de la chaleur, la période de rentabilité permet d'évaluer la faisabilité du projet.

Les possibilités de gestion de l'énergie sont divisées en trois catégories:

- Les *Possibilités de maintenance* sont des initiatives de gestion de l'énergie qui sont *exécutées de façon périodique, au moins une fois par année.*
- Les *Possibilités d'amélioration de coût modique* sont des initiatives de gestion de l'énergie qui sont *réalisées une seule fois, et dont le coût n'est pas élevé.*
- Les *Possibilités de rénovation* sont des initiatives de gestion de l'énergie, et dont le coût est important.

Il est à noter que la distinction entre les améliorations de coût modique et les rénovations dépend normalement de l'importance et de la nature des installations, ainsi que de la politique financière de l'administration.

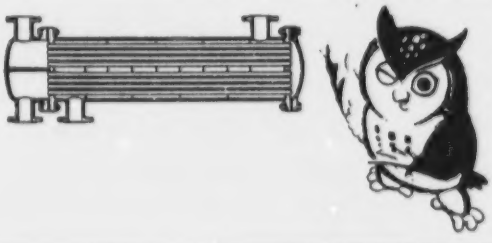
Sommaire

Nombreuses sont les occasions de réduire les consommations d'énergie et leurs dépenses dans les équipements de chauffage et de refroidissement (vapeur et eau). La vigilance déployée par le personnel de gestion, de conception, d'exploitation et de maintenance pour reconnaître ces occasions permettra de réaliser des économies appréciables.

Les fuites de vapeur, y compris celles qui proviennent de purgeurs mal entretenus, d'isolation inadéquate des tuyauteries et équipements, ainsi que les pertes d'énergie liées aux rejets d'une installation constituent un gaspillage d'énergie autant que d'argent. Une gestion efficace de l'énergie consiste à reconnaître l'existence de telles pertes et à les réduire.

La gestion de l'énergie doit être abordée avec un esprit ouvert permettant de s'interroger sur le rendement du processus utilisé depuis longtemps. Le chapitre sur les Possibilités de gestion de l'énergie permettra de reconnaître les anomalies pouvant exister dans une installation particulière. La vigilance accrue du personnel qui gère, exploite ou entretient une installation peut, avec une certaine créativité et de l'assistance spécialisée, être rentable en termes d'économies d'énergie et de coûts.

APPAREILLAGE



Le présent chapitre décrit les appareillages typiques de chauffage et de refroidissement (vapeur et eau) souvent employés dans les secteurs industriel, commercial et institutionnel. Les taux typiques de consommation de vapeur des appareils chauffés à la vapeur sont présentés dans le tableau 7. Les appareillages passés en revue ci-dessous sont divisés en trois catégories:

- appareils chauffés à la vapeur
- appareils chauffés à la vapeur et refroidis à l'eau
- appareils refroidis à l'eau.

Appareils chauffés à la vapeur

Les principaux types d'appareils chauffés à la vapeur sont décrits ci-après sous des rubriques individuelles.

Sécheurs rotatifs

Les sécheurs rotatifs chauffés à la vapeur sont couramment employés dans l'industrie. Ils sont utilisés, par exemple, dans le processus de mouture humide du maïs et dans les cuiseurs rotatifs. Normalement, leur vitesse de rotation est faible. Ce genre d'appareils est divisé en deux groupes, qui varient considérablement selon leurs applications et leurs modes de fonctionnement. Dans le premier groupe, le produit est séché par contact avec la surface d'un cylindre rempli de vapeur. Dans le deuxième groupe, le produit est contenu dans un cylindre rotatif dans lequel des tubes ou des conduites remplis de vapeur assèchent le produit par contact direct. Dans certains cas, le cylindre rotatif est entouré d'une enveloppe chauffante pour augmenter la surface d'échange de chaleur.

Les sécheurs rotatifs remplis de vapeur sont très employés dans les industries du papier, du textile, du plastique et des produits alimentaires; ils comprennent, par exemple, des sécheurs à grain, repasseuses de buanderie, et sécheurs de machine à papier. Pour ces appareils, la pression de vapeur peut atteindre 1 100 kPa (eff.).

Les sécheurs rotatifs à conduites de vapeur interne sont fréquemmment utilisés dans les industries alimentaires et chimiques et dans le conditionnement des viandes; on y remarque des sécheurs à grain et des cuiseurs rotatifs. Le débit de vapeur varie considérablement selon le type spécifique d'appareil et leur utilisation. La pression de vapeur peut atteindre 1 100 kPa (eff.).

Évaporateurs

Les évaporateurs réduisent la teneur en eau d'un produit par l'utilisation de chaleur. Ils sont couramment employés dans les industries de pâtes et papiers, chimiques et textiles. Un évaporateur constitue une application spéciale de l'échangeur de chaleur à calandre, dans lequel le produit circule dans les tubes et la vapeur dans la calandre. Le produit chauffé entre dans une chambre de séparation qui sépare la vapeur du produit pour la réacheminer, bien souvent, pour d'autres fins. Le produit concentré qui en résulte est dirigé vers l'étape de traitement suivante.

Des systèmes d'évaporation à plusieurs stages sont souvent employés, l'évaporateur à triple effet étant le plus courant. La vapeur partant de la première étape sert de source de chaleur à la deuxième étape, et ce processus se répète pour la troisième étape. La vapeur sortant de la troisième étape peut même servir à préchauffer le produit entrant ou à fournir de la chaleur à une autre fin. La consommation de vapeur des évaporateurs varie entre 500 et 50 000 kg/h, alors que les pressions peuvent atteindre 1 200 kPa (eff.).

Appareils de chauffage d'ambiance

Divers appareils chauffés à la vapeur sont employés dans le chauffage des bâtiments. Les appareils les plus courants comprennent des aérothermes, conditionneurs d'air, radiateurs à ailettes, et serpentins. Dans certains cas, un ventilateur permet une circulation forcée de l'air sur la surface chauffée, pour augmenter la chaleur absorbée par l'air et pulser l'air chauffé dans la direction déterminée. Les pressions de vapeur sont généralement faibles, de l'ordre de 2 à 7 kPa (eff.), mais il existe des appareils où la pression de vapeur atteint 700 kPa (eff.).

Préchauffeurs d'air

Les préchauffeurs d'air sont des réchauffeurs spécialisés servant spécifiquement à chauffer l'air destiné à un processus. L'alimentation d'air à haute température pour le séchage du papier ou du bois et pour le préchauffage de l'air de combustion des chaudières sont des applications typiques. Les sécheurs à tunnel sont des exemples de préchauffeurs. Certains appareils peuvent chauffer l'air à de très hautes températures, pouvant atteindre 300°C.

Machines frigorifiques à absorption

Une machine frigorifique à absorption refroidit l'eau pour le conditionnement de l'air ou des applications de procédés, par évaporation de l'eau d'une solution de bromure de lithium. La vapeur peut fournir la chaleur permettant l'évaporation. Pour plus de détails sur les machines frigorifiques à absorption, consulter le Module 11 — Refroidissement et pompes à chaleur.

Machines stationnaires à chambre de vapeur

Ce type d'appareils comprend les presses chauffantes qui sont employées dans l'industrie du contre-plaqué et autres industries de fabrication de matériaux en feuilles, les moules à enveloppe de vapeur pour la fabrication de pièces en caoutchouc et en plastique, les autoclaves pour la stérilisation, et les appareils pour la cuisson de produits en conserve. On distingue trois catégories de machines stationnaires à chambre de vapeur:

- Les appareils où le produit est enfermé dans une presse à enveloppe de vapeur. Des jouets, des caissons de batterie et des volants d'automobile sont formés de cette façon.
- Les appareils où la vapeur est introduite directement dans la chambre contenant le produit, c'est ainsi que fonctionnent les stériliseurs pour les vêtements et pansements chirurgicaux, les autoclaves employés dans la production des plastiques, et la cuisson de produits contenus dans des boîtes en étain.
- Les appareils où le produit est contenu dans une chambre entourée d'une enveloppe où circule la vapeur. C'est le cas de certains stériliseurs et autoclaves où la vapeur n'est pas en contact avec le produit. Les pressions de vapeur et les débits de vapeur peuvent varier grandement, selon l'utilisation.

Appareils de vulcanisation

Les appareils de vulcanisation sont employés dans les industries du caoutchouc et des plastiques pour améliorer les propriétés des produits; ces appareils peuvent être à chauffage direct ou indirect. La vulcanisation ordinaire des pneus est réalisée par des moules venant en contact direct avec les presses à plateaux chauffés à la vapeur. Une réparation localisée est souvent faite à l'aide de la vapeur qui vient en contact direct avec le produit. Normalement, la pression de vapeur ne dépasse pas 1 050 kPa (eff.), et le débit de vapeur varie entre 2 et 60 kg/h.

Appareils chauffés à la vapeur et refroidis à l'eau

Les appareils de cette catégorie sont décrits ci-dessous.

Échangeurs de chaleur

Les échangeurs de chaleur sont employés dans les applications indirectes de chauffage et de refroidissement. Il peut s'agir d'échangeurs multitubulaires à calandre ou d'échangeurs à plaques. Les capacités nominales de pression et de température tout comme les exigences de débits de vapeur et d'eau varient considérablement, selon les applications.

Réservoirs de stockage

Des réservoirs sont employés pour le stockage de liquides ou de solides dont la température doit être augmentée, réduite ou maintenue à un niveau particulier. Le chauffage peut être fourni directement ou indirectement selon le produit. Dans le cas d'un refroidissement, il est généralement indirect. Le chauffage ou le refroidissement peut se faire à l'aide de serpentins ou d'autres dispositifs immergés dans le produit stocké, ou à l'aide de serpentins appliqués contre les parois du réservoir. Comme pour les échangeurs de chaleur, les capacités nominales de pression et de température ainsi que les débits de vapeur et d'eau varient considérablement.

Vaisseaux à enveloppe de vapeur

Les vaisseaux à enveloppe chauffante servent le plus souvent de cuiseurs à la vapeur ou de concentrateurs. Leurs principales utilisations industrielles sont dans le conditionnement des viandes, la fabrication du papier, le raffinage du sucre, la récupération des déchets d'abattoir et le conditionnement des fruits et légumes. La pression de vapeur varie de 1 à 1 000 kPa (eff.) et les débits de vapeur peuvent varier de presque nul jusqu'à 5 000 kg/h.

Bien que moins courant, ces appareils peuvent également servir au refroidissement, dans lequel l'eau de refroidissement circule dans l'enveloppe pour refroidir le produit ou le maintenir à la température désirée. Cela s'appliquerait typiquement à un processus où se déclenche une réaction exothermique (c'est-à-dire qui dégage de la chaleur) et où la température du processus doit être maintenue constante.

Appareils de moulage en matrice

Les appareils de moulage en matrice sont souvent conçus pour assurer un chauffage et un refroidissement. La vapeur sert à réchauffer la matrice avant le moulage, alors que pendant le moulage, l'eau de refroidissement maintient la matrice à la température de service.

Appareils refroidis à l'eau

Les catégories d'appareils à refroidissement à l'eau sont décrits individuellement ci-après.

Compresseurs refroidis à l'eau

Selon le type de compresseur et le nombre de stages de compression, l'eau de refroidissement peut être employée dans des refroidisseurs intermediaires et des refroidisseurs de sortie. Pour de plus amples détails sur les compresseurs, se référer au Module 14 — Compresseurs et turbines.

Bacs de refroidissement à l'eau

Dans les bacs de refroidissement à l'eau, le produit est immergé. Normalement, la température du bain de refroidissement n'est pas critique, et elle est maintenue par l'alimentation continuelle d'eau d'appoint laissant le surplus déborder, ou par cycle répétitif de vidange et de remplissage.

Refroidisseurs

Les refroidisseurs utilisent de l'eau glacée ou une solution de glycol pour assurer le refroidissement dans les applications de réfrigération et de climatisation. Pour de plus amples détails à leur sujet voir le Module 11 — Refroidissement et pompes à chaleur.

Tunnels de refroidissement par aspersion

Dans un tunnel de refroidissement par aspersion, le produit est déplacé mécaniquement dans le tunnel, où il est refroidi par une aspersion d'eau de refroidissement.

Divers appareils refroidis à l'eau

Certains appareils sont refroidis par un courant d'eau qui remplit une cavité et déborde ensuite vers un système de collecte. L'eau absorbe la chaleur développée par l'appareil pour le maintenir à la température désirée. Les mastiqueurs et calandres employés dans la fabrication du caoutchouc sont des applications typiques de ce genre de refroidissement.

Il est à noter que de nombreux systèmes de refroidissement à l'eau employés de nos jour sont en circuit fermé, c'est-à-dire à recirculation d'eau. Lorsque l'eau a acquis une certaine température, elle passe dans une tour de refroidissement, un bassin de refroidissement par évaporation ou un autre dispositif qui rejette à l'atmosphère la chaleur absorbée.

POSSIBILITÉS DE GESTION DE L'ÉNERGIE

«Possibilités de gestion de l'energie» est une expression désignant toutes les façons d'utiliser l'énergie de façon rationnelle afin de réduire les coûts d'exploitation. Dans ce chapitre, plusieurs possibilités typiques sont décrites sous les rubriques Possibilités de maintenance, Possibilités d'amélioration de coût modique et Possibilités de rénovation, avec des exemples concrets des économies d'énergie qui s'en suivent. Même si ce chapitre ne donne pas une liste exhaustive de toutes les possibilités que présentent les appareils de chauffage et de refroidissement (vapeur et eau), il stimulera la vigilance du personnel de gestion, d'exploitation et de maintenance dans la recherche de toutes les possibilités existant dans leurs installations. Les autres modules de la présente série devront être étudiés pour découvrir les possibilités de gestion de l'énergie existant dans les autres types d'appareillage.

Le texte qui suit donne les grandes lignes de plusieurs possibilités de gestion de l'énergie, suivies d'exemples concrets ou de commentaires.

Possibilités de maintenance

Les possibilités de maintenance sont des initiatives de gestion de l'énergie qui sont exécutées de façon périodique, ou moins une fois par année. Les points suivants représentent des possibilités typiques d'économie dans ce secteur.

1. Réparer les fuites aux robinets, raccords et garnitures d'étanchéité.
2. Réparer l'isolant endommagé.
3. Entretenir les dispositifs de régulation de température et de pression.
4. Entretenir les purgeurs.
5. Nettoyer les surfaces d'échange de chaleur.
6. S'assurer que la qualité de vapeur convient au type d'utilisation.
7. S'assurer que les gammes de pression et de température de la vapeur respectent les tolérances specifiées pour les appareils.
8. S'assurer que les purgeurs ont une capacité suffisante pour évacuer tout le condensat.
9. S'assurer que les serpentins de chauffage sont inclinés dans le sens de l'entrée de vapeur vers le purgeur pour éviter qu'ils soient inondés de condensat.

Exemples concrets de maintenance

1. Réparation des fuites

Une analyse au passage révèle qu'il y a une fuite de vapeur au raccord à brides de l'entrée de vapeur sur un échangeur de chaleur. La pression de vapeur en ce point est de 689 kPa (eff.) et l'ouverture de la fuite est évaluée à 6,35 mm de diamètre.

La feuille de travail 9-2 permet de calculer que les économies potentielles peuvent atteindre 12 632$ par année.

La fuite peut être corrigée en remplaçant la garniture d'étanchéité ou coût de 100$, pièces et main-d'ouvre comprises. Le travail peut être prévu pendant une période d'inactivité de l'usine.

$$\text{Période de rentabilité} = \frac{100\$}{12\,632\$}$$

$$= 0{,}0079 \text{ an (3 jours)}$$

2. Réparation de l'isolant

Une analyse au passage révèle qu'il manque d'isolant sur un réservoir de stockage contenant de l'eau à 80°C. L'isolant avait été enlevé au complet pour changer le réservoir de place et seulement la moitié inférieure de l'isolant avait été réinstallée. Le réservoir a un diamètre de 3 mètres, une hauteur de 3 mètres, et un couvercle plat. Au moment de l'analyse, la température ambiante était de 21°C, et il n'y avait pas de vent. La température de l'eau est normalement maintenue à 80°C par de la vapeur à 689 kPa (eff.). Cette condition existait 2 688 heures par année.

$$\text{Surface non isolée} = (3{,}14 \times d \times h) + (3{,}14 \times r^2)$$

$$= (3{,}14 \times 3 \times 1{,}5) + (3{,}14 \times 1{,}5^2)$$

$$= 14{,}137 + 7{,}069$$

$$= 21{,}206 \text{ m}^2$$

La feuille de travail 9-5 permet de calculer que si l'isolant du réservoir était réparé, la perte de chaleur serait réduite de 147 000 000 kJ par année.

Énergie disponible par kg de vapeur à 689 kPa (eff.) = 2 048,3 kJ/kg

Coût de la vapeur = 22$/1 000 kg

$$\text{Perte de chaleur} = \frac{147\,000\,000 \text{ kJ}}{2\,048{,}3 \text{ kJ/kg}}$$

$$= 71\,767 \text{ kg}$$

Économie annuelle ($) = 71 767 × 22$/1 000 kg

= 1 579$

Le coût estimé de l'isolant installé est de 500$

$$\text{Période de rentabilité} = \frac{500\$}{1\,579\$}$$

= 0,318 an (4 mois)

3. Entretien des instruments

L'entretien adéquate des instruments de mesure et de régulation est une façon d'assurer que les bonnes conditions de marche existent, et que toute anomalie est portée à l'attention des opérateurs et du personnel d'entretien. Par exemple, si les indicateurs de pression, de température et de débit n'indiquent pas les valeurs exactes, il est difficile de vérifier que les conditions requises existent réellement (ainsi que de calculer la consommation réelle d'énergie). Le réglage des régulateurs de température et de pression est un autre aspect important. Pour des renseignements sur ce sujet, il faut se reporter au Module 15 — Mesures et contrôles, et au Module 16 — La régulation automatique.

4. Entretien des purgeurs

À une usine grande consommatrice de vapeur, il fut constaté qu'il était difficile de déceler quels purgeurs fonctionnaient mal. Des problèmes très spécifiques se présentaient aux endroits où un grand nombre de purgeurs étaient raccordés à un réservoir collecteur de condensat.

En vue de repérer les purgeurs qui fuyaient, un pyromètre à contact fut acheté pour mesurer la température de surface de la conduite d'évacuation des purgeurs. Certains critères furent définis en fonction du type de purgeur et des conditions de vapeur existantes pour faire un lien entre la température des conduites d'évacuation et l'importance des fuites. Cette technique fut ensuite intégrée au programme d'entretien préventive des purgeurs.

Selon l'évaluation, la réduction des fuites aux purgeurs pourrait permettre des économies de vapeur de l'ordre de 400kg/h.

Économie annuelle ($) = 400 kg/h × 8 760 h/an × 22$/1 000kg

= 77 088$/an

Le coût des opérations de recherche et de réparation des purgeurs qui fuyaient fut estimé à 20 000$ par année.

$$\text{Période de rentabilité} = \frac{20\,000\$}{77\,088\$}$$

= 0,26 an (3 mois)

5. Nettoyage des surfaces d'échange de chaleur

Le nettoyage des surfaces d'échange de chaleur pour les débarrasser des accumulations de boues, de tartre et d'autres dépôts, assure une transmission de chaleur maximale.

6. Vérification de la qualité de vapeur

Il est important de s'assurer que les équipements reçoivent de la vapeur sèche d'une qualité la plus proche de 1. Dans le cas de la vapeur saturée sèche, cette qualité maximale existe puisque toute son humidité a été transformée en vapeur. Dans bien des cas, la qualité de la vapeur sortant d'une chaudière ou d'un autre type de générateur de vapeur s'approche effectivement de l'unité, mais à mesure que la vapeur circule dans le réseau de distribution, il se produit de la condensation qui réduit la qualité de la vapeur. À moins que des moyens efficaces d'évacuation de ce condensat soient appliqués au réseau de distribution, le condensat pénètre dans les appareils et, par conséquent réduit les échanges de chaleur et les appareils risquent d'être inondés de condensat.

7. Réduction de la température et de la pression de la vapeur

L'analyse énergétique d'une installation détermina que la vapeur était bien produite sous une pression de 1 550 kPa (eff.), mais que la plus haute pression réellement nécessaire n'était que de 1 050 kPa (eff.). L'appareillage qui avait besoin d'une vapeur à 1 550 kPa n'existait plus depuis bien des années.

Il fut décidé de réduire progressivement la pression de la vapeur jusqu'à 1 050 kPa. À chaque étape de réduction de pression, les services concernés exprimaient leur réaction au cours de problèmes manifestés. À une pression de 1 150 kPa (eff.), due à une opération à basse pression et des taux de combustion élevés, les opérateurs contrôlaient difficilement les ventilateurs de chaudières entraînés par des turbines à vapeur. La pression fut donc élevée à 1 250 kPa (eff.). La réduction de la pression fut accompagnée d'une réduction des pertes de chaleur dans les conduites de vapeur et des pertes de vapeur dues aux fuites et aux purgeurs. Les économies d'énergie furent estimées à $6{,}087 \times 10^6$ MJ/an. Pour calculer les économies correspondantes en termes de coûts d'exploitation, il faut considérer qu'un mètre cube de gaz naturel contient 37,2 MJ d'énergie et que le rendement des chaudières était de 80%.

$$\text{Économie de gaz naturel} = \frac{6{,}087 \times 10^6}{37{,}2 \times 0{,}8}$$

= 204 536 m^3 par an

Le gaz naturel coûte 0,14$/$m^3$.

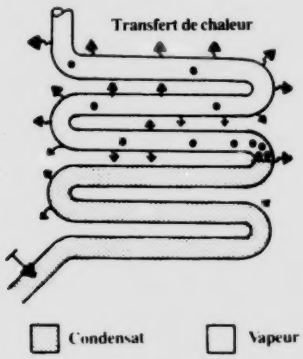
Économie annuelle ($) = 204 536 m^3/an × 0,14$/$m^3$

= 28 635$/an

8. Vérification de la capacité des purgeurs

Le condensat qui n'est pas évacué d'un appareil d'échange de chaleur, tel qu'un serpentin ou un échangeur de chaleur, occupe un certain volume et réduit l'espace disponible pour le contact de la vapeur avec les surfaces d'échange (figure 14). Normalement, la présence de condensat est due à des purgeurs d'une capacité insuffisante ou qui fonctionnent mal. Pour éviter que l'appareil soit inondé de condensat, la capacité des purgeurs doit être définie d'après la plus grande quantité de condensat pouvant être produite pendant les périodes de démarrage. Si le condensat inonde un appareil d'échange de chaleur, l'échange de chaleur est réduit et si l'appareil sert au chauffage, cela augmente le délai nécessaire pour que le produit chauffé atteigne la température désirée. Parfois, pour essayer de surmonter ce problème, on décide d'augmenter la pression et la température de la vapeur, mais cela augmente la consommation d'énergie requise pour produire la vapeur à une température et pression plus élevées. Si, au contraire, on remédiait au problème en agissant directement sur les purgeurs, cette dépense supplémentaire d'énergie ne serait pas nécessaire.

Il est recommandé de consulter les fabricants de purgeurs pour déterminer le type et la capacité des purgeurs à employer.



Serpentin de vapeur partiellement inondé
Figure 14

9. Inclinaison des serpentins de chauffage pour évacuer le condensat

Le refoulement du condensat dans un appareil d'échange réduit la surface disponible pour l'échange de chaleur entre la vapeur et le produit chauffé. Cette situation peut être due à une mauvaise conception ou au montage inadéquat des serpentins. Les serpentins doivent toujours être conçus et installés de façon qu'ils présentent une pente continue vers le bas à partir du raccord d'entrée de vapeur dans l'échangeur jusqu'au purgeur pour éviter que des poches de condensat se forment dans les points bas du serpentin, ce qui causerait les problèmes suivants:

- Inondation du serpentin et de la diminution de l'échange de chaleur.
- Coups de bélier provoqués par les masses de condensat qui sont forcés de circuler dans le réseau et qui risquent d'endommager l'équipement.

Si l'efficacité du transfert de chaleur est inférieure aux prévisions, et si les purgeurs semblent fonctionner correctement, on doit chercher pour la présence de poches de condensat à l'intérieur des serpentins.

Possibilités d'amélioration de coût modique

Les possibilités d'amélioration de coût modique sont des initiatives de gestion de l'énergie qui sont réalisées une seule fois et dont le coût n'est pas élevé. Des exemples typiques sont donnés ci-après:

1. Arrêter les équipements non utilisés.
2. Prévoir des capots verrouillables sur les dispositifs de régulation tels que les thermostats pour empêcher que des personnes non autorisées en modifient le réglage.
3. Faire fonctionner les appareils à leur capacité optimum, chaque fois qu'on le peut. Éviter de faire fonctionner des groupes d'appareil à capacité réduite.
4. Poser des évents thermostatiques.
5. Ajouter des instruments de mesure et de contrôle fournisssant des données à partir desquelles des améliorations à l'exploitation pourront être apportées.
6. Choisir l'emplacement des instruments de régulation assurant le fonctionnement optimal.

Exemples concrets d'améliorations de coût modique

1. Arrêt des équipements

Une analyse au passage révéla qu'un système de chauffage à la vapeur fournissant de l'air chaud à un tunnel de séchage fonctionnait même lorsque le tunnel n'était pas en service. Par une analyse plus poussée, il fut constaté que ce système de chauffage fonctionnait 8 760 heures par année, alors que le tunnel ne servait que 6 000 heures par année. Le réchauffeur employait une vapeur sèche et saturée à une pression de 689 kPa (eff.) et avec un débit de 200 kg/h. La vapeur coûte 22$/1 000 kg.

$$\text{Économie annuelle de vapeur} = (8\,760 - 6\,000)\ \text{h/an} \times 200\ \text{kg/h}$$

$$= 2\,760 \times 200$$

$$= 552\,000\ \text{kg/an}$$

$$\text{Économie annuelle (\$)} = 552\,000\ \text{kg/an} \times 22\$/1\,000\ \text{kg}$$

$$= 12\,144\$$$

Il fut décidé de poser un relais et une électrovanne pour couper la vapeur lorsque le tunnel de séchage n'est pas en service. Le coût estimé de l'achat, de la pose et du raccordement de ce dispositif était de 500$.

$$\text{Période de rentabilité} = \frac{500\$}{12\,144\$}$$

$$= 0{,}041\ \text{an (15 jours)}$$

2. Verrouillage des dispositifs de régulation

Au cours d'une analyse de la consommation énergétique de l'ensemble d'une installation de production, il fut constaté que les thermostats des aérothermes étaient réglés pour maintenir une température de 23,3°C dans les lieux de travail, même s'il avait été convenu avec le personnel que 21,1°C était acceptable. En fait, parfois des employés faisaient fonctionner des ventilateurs d'évacuation pour abaisser la température ambiante, ce qui envoyait de l'air chauffé à l'extérieur. Dix aérothermes étaient impliqués, chacun présentant un débit d'air de 236 L/s. Ces appareils chauffaient l'air extérieur à partir d'une température moyenne d'hiver de -10°C, en employant de la vapeur à 180 kPa absolus. Le condensat extrait des serpentins de chauffage était évacué dans un réservoir de condensat ouvert à l'atmosphère. La durée de la période de chauffage était évaluée à 3 500 heures, et la vapeur produite coûtait 22$/1 000 kg.

Vapeur nécessaire au maintien de 23,3°C (par aérotherme):

$$w \times (h_g - h_f) = \frac{fa}{v_g} \times cp \times (T_2 - T_1)$$

$$w = \frac{\dfrac{fa}{v_g} \times cp \times (T_2 - T_1)}{(h_g - h_f)}$$

$$= \frac{\dfrac{236}{0{,}831} \times 1{,}006 \times (23{,}3 - (-10))}{(2\,701{,}5 - 490{,}7)}$$

$$= 4{,}3\ \text{kg/h}$$

Pour 10 aérothermes, cela représente un total de 43 kg/h de vapeur.

Vapeur nécessaire au maintien de 21°C (par aérotherme) :

$$w \times (h_g - h_f) = \frac{fa}{v_g} \times cp \times (T_2 - T_1)$$

$$w = \frac{\frac{fa}{v_g} \times cp \times (T_2 - T_1)}{(h_g - h_f)}$$

$$= \frac{\frac{236}{0{,}831} \times 1{,}006 \times (21{,}1 - (-10))}{(2\,701{,}5 - 490{,}7)}$$

$$= 4{,}02 \text{ kg/h}$$

Pour 10 aérothermes, cela représente un total de 40,2 kg/h de vapeur.

Économie annuelle de vapeur = 3 500 × (43 — 40,2)

= 3 500 × 2,8

= 9 800 kg/an

Économie annuelle ($) = 9 800 × 22$/1 000

= 216$

Le coût estimé de l'achat et de l'installation de capots verrouillables sur dix thermostats était de 500$.

$$\text{Période de rentabilité} = \frac{500\$}{216\$}$$

= 2,31 ans

3. Marche des appareils à pleine charge

Les appareils chauffés à la vapeur fonctionnent souvent à une charge inférieure à leur capacité nominale. Il vaut la peine de réexaminer les horaires de production pour savoir si certains appareils peuvent être arrêtés pour permette aux appareils restant en service de fonctionner à pleine charge.

La marche à pleine charge présente généralement plusieurs avantages:

- Dans des circonstances normales, les appareils fonctionnant à pleine charge fournissent leur rendement maximal.
- La perte de chaleur est réduite. Avec quatre appareils remplis à moitié d'un produit à chauffer, les pertes de chaleur à l'atmosphère sont, dans la plupart des cas, presque le double de ce que perdent deux appareils remplis à pleine capacité. Si les appareils sont dans un endroit où leurs pertes de chaleur contribuent en quelque sorte au chauffage du bâtiment, la charge de chauffage est réduite d'autant, mais s'ils sont à l'extérieur, la chaleur qu'ils dégagent est dissipée et cela constitue un gaspillage d'énergie et d'argent.

4. Emploi d'évents thermostatiques

L'air entre dans les appareils chauffés à la vapeur de deux façons. D'une part, quel que soit le mode de production de la vapeur, l'eau d'alimentation contient toujours une certaine quantité d'air. D'autre part, lors de la mise en charge d'un circuit de vapeur, que ce soit la mise en charge initiale ou un rechargement après une interruption de marche, il y a toujours de l'air d'emprisonné dans la conduite de vapeur.

Quand de l'air ou tout autre gaz non condensable est présent dans un volume de circulation de vapeur, la vapeur ne peut pas se maintenir à sa température de saturation. Le tableau suivant montre combien la présence d'air affecte la température d'un mélange vapeur/air.

Pression (kPa eff.)	Température de la vapeur saturée (°C)	Température du mélange vapeur-air 5% air	10% air	15% air
14	104°C	102°C	100,5°C	99°C
34	108°C	107°C	105,5°C	104°C
69	115°C	114°C	112°C	110°C
138	126°C	124°C	122°C	121°C

Les évents thermostatiques évacuent très efficacement l'air des circuits de vapeur. Pour assurer le meilleur rendement des circuits de vapeur, les évents doivent être situés aux endroits où l'air peut facilement les atteindre.

5. Adjonction d'instruments de mesure et de contrôle

Sans instruments de mesure et de contrôle (Module 15) sur les appareils de chauffage et de refroidissement, il est très difficile de déterminer si les appareils fonctionnent conformément aux spécifications. Par exemple, s'il n'y a pas de thermomètre sur un appareil servant à chauffer ou à refroidir un liquide, il est difficile de vérifier le fonctionnement d'un régulateur de température. Un thermomètre, par contre, fournit à l'opérateur l'assurance que le régulateur de température remplit efficacement ses fonctions.

6. Choix de l'emplacement des instruments de régulation

L'emplacement des instruments réglant le chauffage ou le refroidissement est très important. Les thermostats qui commandent le chauffage des locaux dans une section de réception sont parfois posés sur les murs extérieurs du bâtiment. À ces endroits, ils détectent une température inférieure à celle qui existe réellement dans l'ensemble de la pièce. Ils pourraient alors exiger plus de chauffage que nécessaire au confort des occupants. Si les thermostats sont installés sur une cloison intérieure ou une colonne, ils détecteront une température ambiante plus représentative et la consommation d'énergie sera réduite.

Possibilités de rénovation

Les possibilités de rénovation sont des initiatives de gestion de l'énergie qui sont réalisées une seule fois et dont le coût est important. Beaucoup de possibilités de cette nature nécessitent une analyse détaillée par des spécialistes et le présent module ne peut les décrire toutes. Par contre, quelques possibilités d'économie sont représentées et accompagnées d'exemples concrets ou d'un simple commentaire. Les opérations suivantes constituent des possibilités de gestion de l'énergie par la rénovation.

1. Convertir les processus de chauffage direct à la vapeur en chauffage indirect, et récupérer le condensat.
2. Installer un isolant ou améliorer l'isolant existant sur les appareils.
3. Déplacer les appareils chauffés à la vapeur installés au centre d'un bâtiment vers le périmètre, afin que leurs pertes de chaleur contribuent à chauffer ce secteur.
4. Réexaminer le concept de chauffage central d'un bâtiment, par opposion au chauffage localisé.
5. Modifier les processus, si possible, pour stabiliser la demande de vapeur ou d'eau.
6. Réviser les horaires de marche des processus pour essayer de réduire les demandes de pointe de vapeur ou d'eau.
7. Évaluer les possibilités de récupération de chaleur de l'eau rejetée par une installation.

Exemples concrets de rénovation

1. Conversion du chauffage direct à la vapeur en chauffage indirect

Une analyse au passage révéla que de la vapeur sortait d'un évent atmosphérique sur un réservoir d'eau chauffé directement à la vapeur. L'eau était chauffée à 60°C par une injection directe de vapeur saturée à 200 kPa absolus. L'opération consistait à remplir le réservoir de 6 000 kg d'eau à 10°C, le chauffer pendant une heure jusqu'à 60°C et à maintenir l'eau à cette température pendant une heure additionnelle. L'eau chauffée était ensuite transférée par pompage vers un réservoir intermédiaire pour être ensuite prélevée à un débit de 0,5 L/s.

Le débit de vapeur fournie au chauffage du réservoir était de 300 kg/h en moyenne.

La possibilité d'employer un échangeur de chaleur fut évaluée pour chauffer l'eau seulement selon les besoins immédiats. Cela éliminerait la perte de vapeur par l'évent du réservoir de stockage et supprimerait même les réservoirs de stockage et intermédiaire. En outre, la consommation de produits chimiques servant à traiter l'eau d'alimentation serait diminuée.

L'échangeur de chaleur ferait alors passer 0,5 L/s d'eau de 10°C à 60°C à l'aide de vapeur saturée à 200 kPa absolus. L'enthalpie de la vapeur est de 2 201,6 kJ/kg. Le condensat serait évacué vers un réservoir de condensat existant ouvert à l'atmosphère et ensuite retourné à la chaudière. L'échangeur de chaleur a un rendement de 80%. Le coût de production de la vapeur est de 22$/1 000 kg.

$$\text{Chaleur nécessaire pour chauffer l'eau} = fw \times (T_1 - T_2) \times 15$$

$$= 0{,}5 \times (60 - 10) \times 15$$

$$= 375 \text{ MJ/h}$$

$$\text{Chaleur fournie par la vapeur} = \frac{375}{0{,}8}$$

$$= 468{,}75 \text{ MJ/h}$$

$$\text{Vapeur nécessaire} = \frac{468{,}75 \times 1\,000}{2\,201{,}6}$$

$$= 213 \text{ kg/h}$$

$$\text{Économie de vapeur par heure} = 300 - 213$$

$$= 87 \text{ kg/h}$$

Considérant que le système fonctionne 7 500 heures par année:

$$\text{Économie annuelle de vapeur} = 87 \times 7\,500$$

$$= 652\,500 \text{ kg/an}$$

La consommation d'eau d'alimentation de la chaudière serait réduite d'autant, et cela diminuerait le coût de traitement de d'eau de 200$ par année.

$$\text{Économie annuelle (\$)} = (652\,500 \times 22\$/1\,000) + 200\$$$

$$= 14\,355\$ + 200\$$$

$$= 14\,555\$$$

La valeur de revente des deux réservoirs, de la pompe et de leur tuyauterie désormais inutiles fut estimé à 2 000$. Le coût estimé de l'échangeur de chaleur est de 8 000$.

$$\text{Période de rentabilité} = \frac{8\,000\$ - 2\,000\$}{14\,555}$$

$$= \frac{6\,000\$}{14\,555\$}$$

$$= 0{,}41 \text{ an (5 mois)}$$

2. Installation ou amélioration de l'isolant

Au cours d'une analyse au passage, il fut constaté qu'un réservoir de stockage extérieur, chauffé à l'électricité et contenant un produit à 75°C, n'était pas isolé. Le réservoir était utilisé 6 000 heures par année, sa surface totale était de 60 m^2, et l'électricité coûtait 0,05$ par kWh.

Il fut proposé d'isoler les parois du réservoir avec un isolant en fibre de verre de 51 mm recouvert d'une enveloppe en aluminium.

La feuille de travail 9-5 permet de calculer que l'installation de l'isolant procurera une économie annuelle d'énergie de 204×10^6W/an.

$$\text{Économie annuelle (\$)} = \frac{204 \times 10^6 \times 0{,}05\$}{1\,000}$$

$$= 10\,200\$$$

Le coût estimé pour l'achat et l'installation de l'isolant est de 2 000$.

$$\text{Période de rentabilité} = \frac{2\,000\$}{10\,200\$}$$

$$= 0{,}196 \text{ an (3 mois)}$$

3. Récupération de la chaleur des équipements à vapeur

Tout appareil chauffé à la vapeur et isolé d'après les normes courantes d'isolation perd de la chaleur à l'atmosphère. Cette perte de chaleur peut souvent contribuer à réduire le chauffage nécessaire pour maintenir les températures intérieures du bâtiment. Lorsque les appareils chauffés à la vapeur sont groupés au même endroit, il se peut que l'excès de chaleur dégagée doive être évacué à l'extérieur pour maintenir une température ambiante acceptable. En pareil cas, il peut être avantageux d'étudier la possibilité de transférer ailleurs certains appareils chauffés à la vapeur afin de réduire le besoin de chauffage du bâtiment et diminuer, par le fait même, la quantité d'air évacuée de l'emplacement original.

4. Réexamen du chauffage du bâtiment

Souvent, un immeuble ou tout autre bâtiment est maintenu à 20°C pendant l'hiver, même si dans certaines zones une température inférieure suffirait. Cela peut être le cas d'un service de réception de marchandises occupé pour une brève période du jour. Le seul besoin pour cette zone serait de maintenir la température au-dessus du point de congélation, à l'exception d'un petit bureau occupé six heures par jour. L'étude d'une possibilité de chauffer le bureau à l'aide de radiateurs électriques et de réduire la température du reste de la zone à 5°C devrait être envisagée. Il en résulterait une économie d'énergie.

5. Stabilisation de la demande de vapeur et d'eau

Une analyse au passage détermina dans un système de refroidissement à l'eau en circuit ouvert, qu'un débit de 5 L/s d'eau était refroidi de 40°C à 20°C et transféré dans un réservoir de stockage, pour être ensuite prélevée à un débit de 2 L/s. À cause de la différence entre ces deux débits, le refroidissement se faisait par cycles de marche et d'arrêt. Il fut décidé d'analyser la possibilité d'éliminer le stockage intermédiaire, de convertir le circuit ouvert en système de recirculation, et de refroidir l'eau à un débit de 2 L/s. Le refroidissement s'effectuerait dans un échangeur de chaleur d'un rendement de 80%, dans lequel l'eau de refroidissement serait de 10°C à l'entrée, et de 15°C à la sortie.

Eau de refroidissement nécessaire pour refroidir 5 L/s d'eau:

$$\text{Chaleur cédée par l'eau à refroidir } Q = fw \times (T_1 - T_2) \times 15$$

$$= 5 \times (40 - 20) \times 15$$

$$= 5 \times 20 \times 15$$

$$= 1\,500 \text{ MJ/h}$$

Chaleur absorbée par l'eau de refroidissement $Q = \frac{1\,500}{0{,}8}$

$= 1\,875$ MJ/h

Eau de refroidissement nécessaire $fw = \frac{Q}{(T_1 - T_2) \times 15}$

$= \frac{1\,875}{(15 - 10) \times 15}$

$= \frac{1\,875}{5 \times 15}$

$= 25$ L/s

Eau de refroidissement nécessaire pour refroidir 2 L/s d'eau :

Chaleur cédée par l'eau à refroidir $Q = fw \times (t_1 - t_2) \times 15$

$= 2 \times (40 - 20) \times 25$

$= 2 \times 20 \times 15$

$= 600$ MJ/h

Chaleur absorbée par l'eau de refroidissement $Q = \frac{600}{0{,}8}$

$= 750$ MJ/h

Eau de refroidissement nécessaire $fw = \frac{Q}{(T_1 - T_2) \times 15}$

$= \frac{750}{(15 - 10) \times 15}$

$= \frac{750}{5 \times 15}$

$= 10$ L/s

Puisque le débit d'eau de refroidissement passe de 25 L/s à 10 L/s, la réduction est de 25 — 10 = 15 L/s.

La diminution du débit d'eau de refroidissement permet de réduire les coûts de pompage et également de diminuer la quantité d'énergie dépensée par l'appareil pour ramener l'eau de refroidissement à sa température d'entrée de 10°C.

6. Révision des horaires de marche en fonction de la demande de pointe

Dans plusieurs installations industrielles, les horaires de marche des procédés ont été déterminés sans se préoccuper, ou très peu, de la consommation d'énergie. Cependant, si la consommation d'énergie est considérée comme un des critères d'étude, les horaires de marche peuvent être planifiés afin de supprimer les pointes de consommation d'énergie. Cela réduit, par le fait même, les demandes de pointe imposées aux divers appareils chauffés à la vapeur et refroidis à l'eau.

7. Récupération de la chaleur contenue dans les eaux rejetées

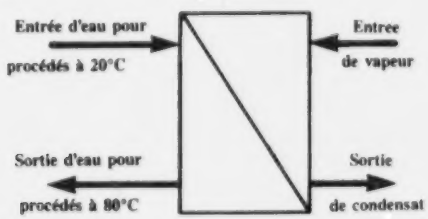
Les eaux rejetées par une installation contiennent parfois une énergie calorifique qui pourrait être récupérée et réutilisée pour réduire la charge des systèmes de production d'énergie. Prenons le cas d'une eau de refroidissement qui était rejetée à l'égout à cause du risque de contamination. Il s'agissait de 20 L/s d'eau à 30°C. Ailleurs dans l'installation, le débit de 15 L/s d'eau était chauffé de 20°C à 80°C dans un échangeur de chaleur à vapeur. L'échangeur de chaleur utilisait de la vapeur sèche et saturée à 700 kPa (abs.).

Il était donc possible de récupérer une partie de la chaleur contenue dans l'eau rejetée en lui faisant préchauffer l'eau devant être chauffée dans l'échangeur de chaleur. Il suffisait, simplement, d'installer un deuxième échangeur de chaleur.

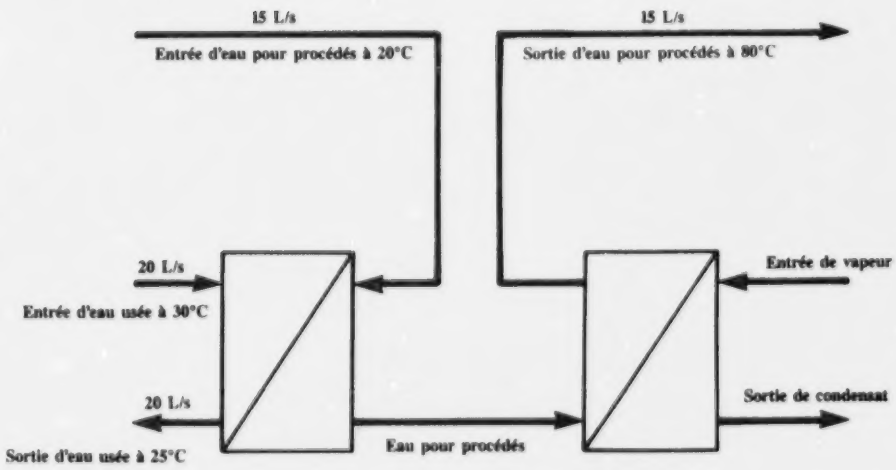
On suppose que la température de l'eau rejetée diminuera de 5°C. Le rendement de la transmission de chaleur de l'échangeur existant et du nouvel échangeur est de 80%.

Les systèmes existant et proposé sont présentés de façon schématique dans la figure 15.

Les feuilles de travail 9-7 et 9-8 servent à faire les calculs nécessaires. La récupération de la chaleur disponible dans l'eau rejetée pourrait réduire de 4 320 000 kg/an la consommation de vapeur sèche et saturée à 700 kPa absolus, ce qui représente une économie de 95 040$ par année. Si le nouveau système de récupération de la chaleur coûte 40 000$, la période de rentabilité serait de 0,42 an (5 mois).



Système existant



Système proposé

Figure 15

Perte de vapeur dans l'atmosphère

Feuille de travail 9-2

Entreprise: EXEMPLE NO.1, MAINTENANCE Date: 20 FÉVRIER 1985

Endroit: RÉPARATION DE FUITES Par: MBE

Appareil: ÉCHANGEUR DE CHALEUR NO. 1

Diamètre estimé de la fuite: 6,35 mm

Pression de vapeur: 689 kPa(effectifs)

Perte de vapeur: 95,7 kg/h (Table 3)

Duréé de service: Nombre d'heures par jour: 24

Nombre de jours par semaine: 5

Nombre de semains par année: 50

Coût de la vapeur: 22 $/1000 kg (A obtenir de l'opérateur du générateur de vapeur)

Vapeur perdue = 95,7 kg/h x 24 h/jour x 5 jours/sem. x 50 sem./an

= 574 200 kg/an

Économies potentielles en dollars:

= 574 200 kg/an x 22 $/1000 kg

= 12 632 $ par année

Pertes de chaleur par les appareils

Feuille de travail 9-5

Entreprise: RÉNOVATION - EXEMPLE NO. 2 Date: 20 FÉVRIER 1985

Endroit: INSTALLATION/AMÉLIORATION D'ISOLANT Par: MBE

Appareil: RÉSERVOIR #1

Superficie: 60 m²

Température du produit: 75 °C

Heures de service par année: 6 000

Type d'isolant proposé: FIBRE DE VERRE

Épaisseur d'isolant proposée: 51 mm

Sans isolant	Avec isolant
Perte de chaleur: = 600 Wh/m²(Table 5)	33,3 Wh/m²(Module 1)
Perte de chaleur totale per heure: Superficie x perte de chaleur	Superficie x perte de chaleur
60 x 600	60 x 33,3
36 000 W/h	1 998 W/h
Perte de chaleur annuelle: Perte de chaleur/h x h/an	Perte de chaleur/h x h/an
36 000 x 6 000	1 998 x 6 000
216 x 10^6 W/an (1)	11,988 x 10^6 W/an (2)

Diminution des pertes de chaleur grâce à la pose d'un isolant

= (1) − (2)

= 216 x 10^6 − 11,988 x 10^6

= 204 x 10^6 W/an

ou 204 x 10^6 W/an x 3,6 kJ/W

= 734,4 x 10^6 kJ/an

Les économies annuelles peuvent alors être calculées en dollars en employant le coût par unité de combustible. S'assurer que les unités de calcul sont compatibles.

Quantité de chaleur disponible dans un écoulement d'eau rejetée pour préchauffer un autre courant d'eau

(méthode approximative)
Feuille de travail 9-7
Page 1 de 2

Entreprise: RÉNOVATION - EXEMPLE NO. 7 Date: 20 FÉVRIER 1985

Endroit: RÉCUPERATION DE CHALEUR Par: MBE

Courante d'eau rejetée: _____

- Débit d'eau (fw): 20 L/s
- Température actuelle de l'eau (T_1): 30 °C
- Température proposée de l'eau à sortie (T_2): 25 °C
  (On doit déterminer cette température avec le fabricant de l'échangeur de chaleur.)
- Quantité de chaleur disponible Q

$$Q = fw \times (T_1 - T_2) \times 15$$

$$= 20 \times (30 - 25) \times 15$$

$$= 1\,500 \text{ MJ/h}$$

$$\text{ou } \frac{1\,500 \text{ MJ/h}}{3\,600}$$

$$= 0,416 \text{ MJ/s}$$

Rendement de l'échangeur de chaleur proposé: 80 %
(à obtenir du fabricant de l'échangeur)

Quantité de chaleur disponible = 0,416 MJ/s x 80 %

= 0,333 MJ/s (1)

Quantité de chaleur disponible dans un écoulement d'eau rejetée pour préchauffer un autre écoulement d'eau

(méthode approximative)
Worksheet 9-7
Page 2 de 2

Entreprise: RÉNOVATION-EXEMPLE NO.7 Date: 20 FÉVRIER 1985

Endroit: RÉCUPÉRATION DE CHALEUR Par: MBE

Courant d'eau à réchauffer:

Débit d'eau (fw): 15 L/s

Témperature de l'eau à entrée (T_1): 20 °C

Température finale désirée (T_2) 80 °C

Quantité de chaleur nécessaire Q

$$Q = fw \times (T_1 - T_2) \times 15$$

$$= 15 \times (20 - 80) \times 15$$

$$= -13\,500 \text{ MJ/h}$$

ou $\frac{13\,500}{3\,600}$ MJ/h (Négliger le sign négatif)

$$= 3,75 \text{ MJ/s} \quad (2)$$

Dimunition de l'énergie calorifique nécessaire pour chauffer le courant d'eau à la température finale désirée:

$$= (2) \text{ MJ/s} - (1) \text{ MJ/s}$$

$$= 3,75 - 0,333$$

$$= 3,417 \text{ MJ/s} \quad (3)$$

Besoins de vapeur pur chauffer de l'eau
dans un échangeur de chaleur vapeur-eau

(méthode approximative)
Feuille de travail 9-8
Page 1 de 2

Entreprise: RÉNOVATION - EXEMPLE NO. 7 Date: 20 FÉVRIER 1985

Endroit: RÉCUPÉRATION DE CHALEUR Par: MBE

Vapeur

Pression	598,7	kPa(eff.)	
Température	164,96	°C	
Enthalpie	2 762	kJ/kg	(1)

Condensat

Pression	598,7	kPa(eff.)	
Température	164,96	°C	
Enthalpie	697,1	kJ/kg	(2)

Chaleur disponible dans la vapeur

(1) − (2)

= 2 762 − 697,1

= 2 064,9 kJ/kg (3)

Rendement de l'échangeur de chaleur: 80 % (4)

Chaleur disponible pour chauffer l'eau = (3) x (4) kJ/kg

= 2 064,9 x 0,80

= 1 651,9 kJ/kg

ou $\frac{1\,651,9 \text{ kJ/kg}}{1000 \text{ kJ/MJ}}$

= 1,6519 MJ/kg (5)

Vapeur nécessaire au chauffage (sans récupération de chaleur) = $\frac{\text{Feuille de travail 9-7 (2)}}{\text{Feuille de travail 9-8 (5)}}$

= $\frac{3,75 \text{ MJ/s}}{1,6519 \text{ MJ/kg}}$

2,27 kg/s (6)

Besoins de vapeur pour chauffer de l'eau dans un échangeur de chaleur vapeur-eau
(Approximate Method)
Feuille de travail 9-8
Page 2 de 2

Entreprise: RÉNOVATION - EXEMPLE NO.1 Date: 20 FÉVRIER 1985

Endroit: RÉCUPÉRATION DE CHALEUR Par: MBE

Vapeur nécessaire au chauffage (avec récupération de la chaleur) = Feuille de travail 9-7 (3) / feuille de travail 9-8 (5)

= 3,417 MJ/s / 1,6519 MJ/kg

= 2,07 kg/s (7)

Économies de vapeur dues à la récupération de la chaleur = (6) − (7)

= 2,27 − 2,07

= 0,20 kg/s (8)

Heures de service par année = 6 000 h (9)

Économies annuelles de vapeur par récupération de la chaleur = (8) x (9) x 3 600

= 0,20 x 6 000 x 3 600

= 4 320 000 kg/an (10)

Coût de la vapeur = 22 $ /1 000 kg (11)

Économies annuelles en dollars = (10) x (11)

= 4 320 000 x 22/1000

= 95,040 $ par année (12)

Coût installé de l'équipement de récupération de la chaleur = 40 000 $ (13)

Période de rentabilité = (13) / (12)

= 40 000 / 95 040

= 0,42 ans

ANNEXES

A Glossaire
B Tables
C Conversions courantes
D Feuilles de travail

Glossaire

Analyse au passage — Inspection visuelle d'une installation pour étudier la consommation de l'énergie.

Analyse de diagnostic — Analyse d'une possibilité d'économiser l'énergie, pouvant comporter l'évaluation du fonctionnement actuel du processus, l'étude des relevés, le calcul des économies possibles, et l'estimation des dépenses d'investissement et des coûts d'exploitation afin de calculer la rentabilité.

Appareil sous pression — Appareil conçu pour fonctionner à des pressions supérieures ou inférieures à la pression atmosphérique.

Chaleur latente — Quantité de chaleur exprimée en kJ/kg que doit absorber 1 kilogramme d'eau pour être transformé en 1 kilogramme de vapeur à la même pression. La même quantité de chaleur doit être extraite pour que la vapeur se condense et forme de nouveau 1 kilogramme d'eau.

Chaleur sensible — Quantité de chaleur exprimée en kJ/kg que doit absorber 1 kilogramme d'eau pour que sa température passe de 0°C au point d'ébullition à n'importe quelle pression spécifique.

Chaleur totale de la vapeur — Somme de la chaleur latente et de la chaleur sensible, exprimée en kJ/kg.

Conductance thermique (C) — Quantité de chaleur transmise dans une unité de temps par unité de surface d'un corps ou d'un ensemble de dimensions définies, en présence d'un écart d'un degré entre les températures moyennes des surfaces, exprimée en $W/m^2 \cdot °C$.

Énergie — Grandeur caractérisant l'aptitude d'un système physique à fournir un travail. L'énergie existe sous différentes formes transformables: énergie thermique (chaleur), mécanique (travail), électrique et chimique. L'énergie est mesurée en kilowattheures (kWh) ou en mégajoules (MJ).

Énergie calorifique — Forme d'énergie transférée d'un point de température supérieure à un point de température inférieure. Exprimée en MJ/kg.

Énergie gaspillée — Énergie qui est dissipée sans avoir été pleinement utilisée. Cela peut comprendre l'énergie sous forme de vapeur, de gaz d'échappement, d'eau de vidange et même de déchet.

Énergie variable — Consommation d'énergie liée à la production.

Enthalpie — Quantité de chaleur contenue dans un corps par unité de masse, exprimée en kJ/kg.

Intensité énergétique — Quantité d'énergie nécessaire à la fabrication d'un produit ou d'un groupe de produits, exprimée en énergie consommée par unité de production.

Isolant — Matériau de faible conductivité thermique servant à réduire l'échange de chaleur.

Masse volumique — Nombre indiquant le rapport entre le poids d'un volume donné d'un corps et le poids du même volume d'eau. Si la masse volumique est supérieure à 1, le corps est plus lourd que l'eau; si sa masse volumique est inférieure à 1, le corps est plus léger que l'eau.

Possibilités d'amélioration de coût modique — Initiatives de gestion de l'énergie réalisées une seule fois, et dont le coût n'est pas élevé.

Possibilités de maintenance — Initiatives de gestion de l'énergie exécutées de façon périodique, au moins une fois par année.

Possibilités de rénovation — Initiatives de gestion de l'énergie réalisées une seule fois, et dont le coût est important.

Pression absolue — Toute pression dont la base de mesure est le vide absolu, exprimée en kPa absolus.

Pression effective — Toute pression dont la base de mesure est la pression atmosphérique, exprimée en kPa (eff.). À noter que kPa (eff.) + pression atmosphérique = kPa (abs.).

Résistance thermique (R) — Coefficient indiquant les propriétés isolantes relatives, ou encore la résistance à la chaleur d'un matériau ou d'un ensemble de matériaux. S'exprime en $(m^2 \cdot °C)/W$.

Système SI — Système de mesure légal au Canada. L'appellation Système International d'unités est abrégé par le sigle SI dans toutes les langues.

Température d'approche d'un échangeur de chaleur — Écart de température entre le fluide chaud et le fluide froid qu'on emploie dans le calcul d'un échangeur de chaleur comme une limite pratique pour l'échange de chaleur devant se produire. Normalement de 3°C à 5°C.

Transmittance thermique (U) — Quantité de chaleur transmise dans une unité de temps par unité de surface d'un corps ou d'un ensemble, y compris ses couches limites, divisée par l'écart de température entre les deux côtés du corps ou de l'ensemble, exprimée en $W/(m^2 \cdot °C)$.

Type d'énergie — Combustible ou forme d'énergie utilisé par une installation donnée (exemple: pétrole, électricité et gaz naturel).

Vapeur instantanée — Vapeur formée par la détente du condensat à une pression inférieure à celle sous laquelle il s'était formé. Lorsque la pression du condensat baisse, une certaine quantité de chaleur sensible s'en dégage et est absorbée sous la forme de chaleur latente, ce qui fait qu'une partie du condensat «se vaporise instantanément».

Vapeur saturée — Vapeur pure à la température correspondant au point d'ébullition de l'eau à une pression spécifique.

PROPRIÉTÉS DE LA VAPEUR ET DE L'EAU SATURÉES (TEMPÉRATURE)
TABLE 1

Température °C	Température K	Press. kPa	Volume, m^3/kg			Enthalpie, kJ/kg			Entropie, kJ/kg K		
			Eau	Évap.	Vapeur	Eau	Évap.	Vapeur	Eau	Évap.	Vapeur
t	T	P	v_f	v_{fg}	v_g	h_f	h_{fg}	h_g	s_f	s_{fg}	s_g
0.	273.15	0.6108	0.0010002	206.30	206.31	-0.04	2501.6	2501.6	-0.0002	9.1579	9.1577
0.01	273.16	0.6112	0.0010002	206.16	206.16	0.00	2501.6	2501.6	0.0000	9.1575	9.1575
1.0	274.15	0.6566	0.0010001	192.61	192.61	4.17	2499.2	2503.4	0.0153	9.1158	9.1311
2.0	275.15	0.7055	0.0010001	179.92	179.92	8.39	2496.8	2505.2	0.0306	9.0741	9.1047
3.0	276.15	0.7575	0.0010001	168.17	168.17	12.60	2494.5	2507.1	0.0459	9.0326	9.0785
4.0	277.15	0.8129	0.0010000	157.27	157.27	16.80	2492.1	2508.9	0.0611	8.9915	9.0526
5.0	278.15	0.8718	0.0010000	147.16	147.16	21.01	2489.7	2510.7	0.0762	8.9507	9.0269
6.0	279.15	0.9345	0.0010000	137.78	137.78	25.21	2487.4	2512.6	0.0913	8.9102	9.0015
7.0	280.15	1.0012	0.0010001	129.06	129.06	29.41	2485.0	2514.4	0.1063	8.8699	8.9762
8.0	281.15	1.0720	0.0010001	120.96	120.97	33.60	2482.6	2516.2	0.1213	8.8300	8.9513
9.0	282.15	1.1472	0.0010002	113.43	113.44	37.80	2480.3	2518.1	0.1362	8.7903	8.9265
10.0	283.15	1.2270	0.0010003	106.43	106.43	41.99	2477.9	2519.9	0.1510	8.7510	8.9020
12.0	285.15	1.4014	0.0010004	93.83	93.84	50.38	2473.2	2523.6	0.1805	8.6731	8.8536
14.0	287.15	1.5973	0.0010007	82.90	82.90	58.75	2468.5	2527.2	0.2098	8.5963	8.8060
16.0	289.15	1.8168	0.0010010	73.38	73.38	67.13	2463.8	2530.9	0.2388	8.5205	8.7593
18.0	291.15	2.0624	0.0010013	65.09	65.09	75.50	2459.0	2534.5	0.2677	8.4458	8.7135
20.0	293.15	2.337	0.0010017	57.84	57.84	83.86	2454.3	2538.2	0.2963	8.3721	8.6684
22.0	295.15	2.642	0.0010022	51.49	51.49	92.23	2449.6	2541.8	0.3247	8.2994	8.6241
24.0	297.15	2.982	0.0010026	45.92	45.93	100.59	2444.9	2545.5	0.3530	8.2277	8.5806
26.0	299.15	3.360	0.0010032	41.03	41.03	108.95	2440.2	2549.1	0.3810	8.1569	8.5379
28.0	301.15	3.778	0.0010037	36.73	36.73	117.31	2435.4	2552.7	0.4088	8.0870	8.4959
30.0	303.15	4.241	0.0010043	32.93	32.93	125.66	2430.7	2556.4	0.4365	8.0181	8.4546
32.0	305.15	4.753	0.0010049	29.57	29.57	134.02	2425.9	2560.0	0.4640	7.9500	8.4140
34.0	307.15	5.318	0.0010056	26.60	26.60	142.38	2421.2	2563.6	0.4913	7.8828	8.3740
36.0	309.15	5.940	0.0010063	23.97	23.97	150.74	2416.4	2567.2	0.5184	7.8164	8.3348
38.0	311.15	6.624	0.0010070	21.63	21.63	159.09	2411.7	2570.8	0.5453	7.7509	8.2962
40.0	313.15	7.375	0.0010078	19.545	19.546	167.45	2406.9	2574.4	0.5721	7.6861	8.2583
42.0	315.15	8.198	0.0010086	17.691	17.692	175.81	2402.1	2577.9	0.5987	7.6222	8.2209
44.0	317.15	9.100	0.0010094	16.035	16.036	184.17	2397.3	2581.5	0.6252	7.5590	8.1842
46.0	319.15	10.086	0.0010103	14.556	14.557	192.53	2392.5	2585.1	0.6514	7.4966	8.1481
48.0	321.15	11.162	0.0010112	13.232	13.233	200.89	2387.7	2588.6	0.6776	7.4350	8.1125
50.0	323.15	12.335	0.0010121	12.045	12.046	209.26	2382.9	2592.2	0.7035	7.3741	8.0776
52.0	325.15	13.613	0.0010131	10.979	10.980	217.62	2378.1	2595.7	0.7293	7.3138	8.0432
54.0	327.15	15.002	0.0010140	10.021	10.022	225.99	2373.2	2599.2	0.7550	7.2543	8.0093
56.0	329.15	16.511	0.0010150	9.158	9.159	234.35	2368.4	2602.7	0.7804	7.1955	7.9759
58.0	331.15	18.147	0.0010161	8.380	8.381	242.72	2363.5	2606.2	0.8058	7.1373	7.9431
60.0	333.15	19.920	0.0010171	7.678	7.679	251.09	2358.6	2609.7	0.8310	7.0798	7.9108
62.0	335.15	21.838	0.0010182	7.043	7.044	259.46	2353.7	2613.2	0.8560	7.0230	7.8790
64.0	337.15	23.912	0.0010193	6.468	6.469	267.84	2348.9	2616.6	0.8809	6.9667	7.8477
66.0	339.15	26.150	0.0010205	5.947	5.948	276.21	2343.9	2620.1	0.9057	6.9111	7.8168
68.0	341.15	28.563	0.0010217	5.475	5.476	284.59	2338.9	2623.5	0.9303	6.8561	7.7864
70.0	343.15	31.16	0.0010228	5.045	5.046	292.97	2334.0	2626.9	0.9548	6.8017	7.7565
72.0	345.15	33.96	0.0010241	4.655	4.656	301.36	2329.0	2630.3	0.9792	6.7478	7.7270
74.0	347.15	36.96	0.0010253	4.299	4.300	309.74	2324.0	2633.7	1.0034	6.6945	7.6979
76.0	349.15	40.19	0.0010266	3.975	3.976	318.13	2318.9	2637.1	1.0275	6.6418	7.6693
78.0	351.15	43.65	0.0010279	3.679	3.680	326.52	2313.9	2640.4	1.0514	6.5896	7.6410
80.0	353.15	47.36	0.0010292	3.408	3.409	334.92	2308.8	2643.8	1.0753	6.5380	7.6132
82.0	355.15	51.33	0.0010305	3.161	3.162	343.31	2303.8	2647.1	1.0990	6.4868	7.5858
84.0	357.15	55.57	0.0010319	2.934	2.935	351.71	2298.6	2650.4	1.1225	6.4362	7.5588
86.0	359.15	60.11	0.0010333	2.726	2.727	360.12	2293.5	2653.6	1.1460	6.3861	7.5321
88.0	361.15	64.95	0.0010347	2.535	2.536	368.53	2288.4	2656.9	1.1693	6.3365	7.5058
90.0	363.15	70.11	0.0010361	2.3603	2.3613	376.94	2283.2	2660.1	1.1925	6.2873	7.4799
92.0	365.15	75.61	0.0010376	2.1992	2.2002	385.36	2278.0	2663.4	1.2156	6.2387	7.4543
94.0	367.15	81.46	0.0010391	2.0509	2.0519	393.78	2272.9	2666.6	1.2386	6.1905	7.4291
96.0	369.15	87.69	0.0010406	1.9143	1.9153	402.20	2267.5	2669.7	1.2615	6.1427	7.4042
98.0	371.15	94.30	0.0010421	1.7883	1.7893	410.63	2262.2	2672.9	1.2842	6.0954	7.3796
100.0	373.15	101.33	0.0010437	1.6720	1.6730	419.06	2256.9	2676.0	1.3069	6.0485	7.3554

PROPRIÉTÉS DE LA VAPEUR ET DE L'EAU SATURÉES (TEMPÉRATURE)
TABLE 1

Température		Press.	Volume, m^3/kg			Enthalpie, kJ/kg			Entropie, kJ/kg K		
°C	K	kPa	Eau	Évap.	Vapeur	Eau	Évap.	Vapeur	Eau	Évap.	Vapeur
t	T	P	v_f	v_{fg}	v_g	h_f	h_{fg}	h_g	s_f	s_{fg}	s_g
100.0	373.15	101.33	0.0010437	1.6720	1.6730	419.06	2256.9	2676.0	1.3069	6.0485	7.3554
105.0	378.15	120.80	0.0010477	1.4182	1.4193	440.17	2243.6	2683.7	1.3630	5.9331	7.2962
110.0	383.15	143.27	0.0010519	1.2089	1.2099	461.32	2230.0	2691.3	1.4185	5.8203	7.2388
115.0	388.15	169.06	0.0010562	1.0352	1.0363	482.50	2216.2	2698.7	1.4733	5.7099	7.1832
120.0	393.15	198.54	0.0010606	0.8905	0.8915	503.72	2202.2	2706.0	1.5276	5.6017	7.1293
125.0	398.15	232.1	0.0010652	0.7692	0.7702	524.99	2188.0	2713.0	1.5813	5.4957	7.0769
130.0	403.15	270.1	0.0010700	0.6671	0.6681	546.31	2173.6	2719.9	1.6344	5.3917	7.0261
135.0	408.15	313.1	0.0010750	0.5807	0.5818	567.68	2158.9	2726.6	1.6869	5.2897	6.9766
140.0	413.15	361.4	0.0010801	0.5074	0.5085	589.10	2144.0	2733.1	1.7390	5.1894	6.9284
145.0	418.15	415.5	0.0010853	0.4449	0.4460	610.59	2128.7	2739.3	1.7906	5.0910	6.8815
150.0	423.15	476.0	0.0010908	0.3914	0.3924	632.15	2113.2	2745.4	1.8416	4.9941	6.8358
155.0	428.15	543.3	0.0010964	0.3453	0.3464	653.77	2097.4	2751.2	1.8923	4.8989	6.7911
160.0	433.15	618.1	0.0011022	0.3057	0.3068	675.47	2081.3	2756.7	1.9425	4.8050	6.7475
165.0	438.15	700.8	0.0011082	0.2713	0.2724	697.25	2064.8	2762.0	1.9923	4.7126	6.7048
170.0	443.15	792.0	0.0011145	0.2414	0.2426	719.12	2047.9	2767.1	2.0416	4.6214	6.6630
175.0	448.15	892.4	0.0011209	0.21542	0.21654	741.07	2030.7	2771.8	2.0906	4.5314	6.6221
180.0	453.15	1002.7	0.0011275	0.19267	0.19380	763.12	2013.2	2776.3	2.1393	4.4426	6.5819
185.0	458.15	1123.3	0.0011344	0.17272	0.17386	785.26	1995.2	2780.4	2.1876	4.3548	6.5424
190.0	463.15	1255.1	0.0011415	0.15517	0.15632	807.52	1976.7	2784.3	2.2356	4.2680	6.5036
195.0	468.15	1398.7	0.0011489	0.13969	0.14084	829.88	1957.9	2787.8	2.2833	4.1821	6.4654
200.0	473.15	1554.9	0.0011565	0.12600	0.12716	852.37	1938.6	2790.9	2.3307	4.0971	6.4278
205.0	478.15	1724.3	0.0011644	0.11386	0.11503	874.99	1918.8	2793.8	2.3778	4.0128	6.3906
210.0	483.15	1907.7	0.0011726	0.10307	0.10424	897.73	1898.5	2796.2	2.4247	3.9293	6.3539
215.0	488.15	2106.0	0.0011811	0.09344	0.09463	920.63	1877.6	2798.3	2.4713	3.8463	6.3176
220.0	493.15	2319.8	0.0011900	0.08485	0.08604	943.67	1856.2	2799.9	2.5178	3.7639	6.2817
225.0	498.15	2550.	0.0011992	0.07715	0.07835	966.88	1834.3	2801.2	2.5641	3.6820	6.2461
230.0	503.15	2798.	0.0012087	0.07024	0.07145	990.27	1811.7	2802.0	2.6102	3.6006	6.2107
235.0	508.15	3063.	0.0012187	0.06403	0.06525	1013.83	1788.5	2802.3	2.6561	3.5194	6.1756
240.0	513.15	3348.	0.0012291	0.05843	0.05965	1037.60	1764.6	2802.2	2.7020	3.4386	6.1406
245.0	518.15	3652.	0.0012399	0.05337	0.05461	1061.58	1740.0	2801.6	2.7478	3.3579	6.1057
250.0	523.15	3978.	0.0012513	0.04879	0.05004	1085.78	1714.7	2800.4	2.7935	3.2773	6.0708
255.0	528.15	4325.	0.0012632	0.04463	0.04590	1110.23	1688.5	2798.7	2.8392	3.1968	6.0359
260.0	533.15	4694.	0.0012756	0.04086	0.04213	1134.94	1661.5	2796.4	2.8848	3.1161	6.0010
265.0	538.15	5088.	0.0012887	0.03742	0.03871	1159.93	1633.5	2793.5	2.9306	3.0353	5.9658
270.0	543.15	5506.	0.0013025	0.03429	0.03559	1185.23	1604.6	2789.9	2.9763	2.9541	5.9304
275.0	548.15	5950.	0.0013170	0.03142	0.03274	1210.86	1574.7	2785.5	3.0222	2.8725	5.8947
280.0	553.15	6420.	0.0013324	0.02879	0.03013	1236.84	1543.6	2780.4	3.0683	2.7903	5.8586
285.0	558.15	6919.	0.0013487	0.02638	0.02773	1263.21	1511.3	2774.5	3.1146	2.7074	5.8220
290.0	563.15	7446.	0.0013659	0.02417	0.02554	1290.01	1477.6	2767.6	3.1611	2.6237	5.7848
295.0	568.15	8004.	0.0013844	0.02213	0.02351	1317.27	1442.6	2759.8	3.2079	2.5389	5.7469
300.0	573.15	8593.	0.0014041	0.020245	0.021649	1345.05	1406.0	2751.0	3.2552	2.4529	5.7081
305.0	578.15	9214.	0.0014252	0.018502	0.019927	1373.40	1367.7	2741.1	3.3029	2.3656	5.6685
310.0	583.15	9870.	0.0014480	0.016886	0.018334	1402.39	1327.6	2730.0	3.3512	2.2766	5.6278
315.0	588.15	10561.	0.0014726	0.015383	0.016856	1432.09	1285.5	2717.6	3.4002	2.1856	5.5858
320.0	593.15	11289.	0.0014995	0.013980	0.015480	1462.60	1241.1	2703.7	3.4500	2.0923	5.5423
325.0	598.15	12056.	0.0015289	0.012666	0.014195	1494.03	1194.0	2688.0	3.5008	1.9961	5.4969
330.0	603.15	12863.	0.0015615	0.011428	0.012989	1526.52	1143.6	2670.2	3.5528	1.8962	5.4490
335.0	608.15	13712.	0.0015978	0.010256	0.011854	1560.25	1089.5	2649.7	3.6063	1.7914	5.3979
340.0	613.15	14605.	0.0016387	0.009142	0.010780	1595.47	1030.7	2626.2	3.6616	1.6811	5.3427
345.0	618.15	15545.	0.0016858	0.008077	0.009763	1632.52	966.4	2598.9	3.7193	1.5636	5.2828
350.0	623.15	16535.	0.0017411	0.007058	0.008799	1671.94	895.7	2567.7	3.7800	1.4376	5.2177
355.0	628.15	17577.	0.0018085	0.006051	0.007859	1716.63	813.8	2530.4	3.8489	1.2953	5.1442
360.0	633.15	18675.	0.0018959	0.005044	0.006940	1764.17	721.3	2485.4	3.9210	1.1390	5.0600
365.0	638.15	19833.	0.0020160	0.003996	0.006012	1817.96	610.0	2428.0	4.0021	0.9558	4.9579
370.0	643.15	21054.	0.0022136	0.002759	0.004973	1890.21	452.6	2342.8	4.1108	0.7036	4.8144
371.0	644.15	21306.	0.0022778	0.002446	0.004723	1910.50	407.4	2317.9	4.1414	0.6324	4.7738
372.0	645.15	21562.	0.0023636	0.002075	0.004439	1935.57	351.4	2287.0	4.1794	0.5446	4.7240
373.0	646.15	21820.	0.0024963	0.001588	0.004084	1970.50	273.5	2244.0	4.2326	0.4233	4.6559
374.0	647.15	22081.	0.0028427	0.000623	0.003466	2046.72	109.5	2156.2	4.3493	0.1692	4.5185
374.15	647.30	22120.	0.00317	0.0	0.00317	2107.37	0.0	2107.4	4.4429	0.0	4.4429

PROPRIÉTES DE LA VAPEUR ET DE L'EAU SATURÉES (PRESSION)
TABLE 1

Press.	Temp.	Volume, m^3/kg			Enthalpie, kJ/kg			Entropie, kJ/kg K			Énergie, kJ/kg	
kPa	°C	Eau	Évap.	Vapeur	Eau	Évap.	Vapeur	Eau	Évap.	Vapeur	Eau	Vapeur
p	t	v_f	v_{fg}	v_g	h_f	h_{fg}	h_g	s_f	s_{fg}	s_g	U_f	U_g
1.0	6.983	0.0010001	129.21	129.21	29.34	2485.0	2514.4	0.1060	8.8706	8.9767	29.33	2385.2
1.1	8.380	0.0010001	118.04	118.04	35.20	2481.7	2516.9	0.1269	8.8149	8.9418	35.20	2387.1
1.2	9.668	0.0010002	108.70	108.70	40.60	2478.7	2519.3	0.1461	8.7640	8.9101	40.60	2388.9
1.3	10.866	0.0010003	100.76	100.76	45.62	2475.9	2521.5	0.1638	8.7171	8.8809	45.62	2390.5
1.4	11.985	0.0010004	93.92	93.92	50.31	2473.2	2523.5	0.1803	8.6737	8.8539	50.31	2392.0
1.5	13.036	0.0010006	87.98	87.98	54.71	2470.7	2525.5	0.1957	8.6332	8.8288	54.71	2393.5
1.6	14.026	0.0010007	82.76	82.77	58.86	2468.4	2527.3	0.2101	8.5952	8.8054	58.86	2394.8
1.8	15.855	0.0010010	74.03	74.03	66.52	2464.1	2530.6	0.2367	8.5240	8.7627	66.52	2397.4
2.0	17.513	0.0010012	67.01	67.01	73.46	2460.2	2533.6	0.2607	8.4639	8.7246	73.46	2399.6
2.2	19.031	0.0010015	61.23	61.23	79.81	2456.6	2536.4	0.2825	8.4077	8.6901	79.81	2401.7
2.4	20.433	0.0010018	56.39	56.39	85.67	2453.3	2539.0	0.3025	8.3563	8.6587	85.67	2403.6
2.6	21.737	0.0010021	52.28	52.28	91.12	2450.2	2541.3	0.3210	8.3089	8.6299	91.12	2405.4
2.8	22.955	0.0010024	48.74	48.74	96.22	2447.3	2543.6	0.3382	8.2650	8.6033	96.21	2407.1
3.0	24.100	0.0010027	45.67	45.67	101.00	2444.6	2545.6	0.3544	8.2241	8.5785	101.00	2408.6
3.5	26.694	0.0010033	39.48	39.48	111.85	2438.5	2550.4	0.3907	8.1325	8.5232	111.84	2412.2
4.0	28.983	0.0010040	34.80	34.80	121.41	2433.1	2554.5	0.4225	8.0530	8.4755	121.41	2415.3
4.5	31.035	0.0010046	31.14	31.14	129.99	2428.2	2558.2	0.4507	7.9827	8.4335	129.98	2418.1
5.0	32.898	0.0010052	28.19	28.19	137.77	2423.8	2561.6	0.4763	7.9197	8.3960	137.77	2420.8
5.5	34.605	0.0010058	25.77	25.77	144.91	2419.8	2564.7	0.4995	7.8626	8.3621	144.90	2422.9
6.0	36.183	0.0010064	23.74	23.74	151.50	2416.0	2567.5	0.5209	7.8104	8.3312	151.50	2425.1
6.5	37.651	0.0010069	22.015	22.016	157.64	2412.5	2570.2	0.5407	7.7622	8.3029	157.63	2427.0
7.0	39.025	0.0010074	20.530	20.531	163.38	2409.2	2572.6	0.5591	7.7176	8.2767	163.37	2428.9
7.5	40.316	0.0010079	19.238	19.239	168.77	2406.2	2574.9	0.5763	7.6760	8.2523	168.76	2430.6
8.0	41.534	0.0010084	18.104	18.105	173.86	2403.2	2577.1	0.5925	7.6370	8.2296	173.86	2432.3
9.0	43.787	0.0010094	16.203	16.204	183.28	2397.9	2581.1	0.6224	7.5657	8.1881	183.27	2435.3
10.	45.833	0.0010102	14.674	14.675	191.83	2392.9	2584.8	0.6493	7.5018	8.1511	191.82	2438.0
11.	47.710	0.0010111	13.415	13.416	199.68	2388.6	2588.1	0.6738	7.4439	8.1177	199.67	2440.5
12.	49.446	0.0010119	12.361	12.362	206.94	2384.3	2591.2	0.6963	7.3909	8.0872	206.93	2442.8
13.	51.062	0.0010126	11.465	11.466	213.70	2380.3	2594.0	0.7172	7.3420	8.0592	213.68	2445.0
14.	52.574	0.0010133	10.693	10.694	220.02	2376.7	2596.7	0.7367	7.2967	8.0334	220.01	2447.0
15.	53.997	0.0010140	10.022	10.023	225.97	2373.2	2599.2	0.7549	7.2544	8.0093	225.96	2448.9
16.	55.341	0.0010147	9.432	9.433	231.59	2370.0	2601.6	0.7721	7.2148	7.9869	231.58	2450.6
18.	57.826	0.0010160	8.444	8.445	241.99	2363.9	2605.9	0.8036	7.1424	7.9460	241.98	2453.9
20.	60.086	0.0010172	7.649	7.650	251.45	2358.4	2609.9	0.8321	7.0774	7.9094	251.43	2456.9
22.	62.162	0.0010183	6.994	6.995	260.14	2353.3	2613.5	0.8581	7.0184	7.8764	260.12	2459.6
24.	64.082	0.0010194	6.446	6.447	268.18	2348.6	2616.8	0.8820	6.9644	7.8464	268.16	2462.1
26.	65.871	0.0010204	5.979	5.980	275.67	2344.2	2619.9	0.9041	6.9147	7.8188	275.65	2464.4
28.	67.547	0.0010214	5.578	5.579	282.69	2340.0	2622.7	0.9248	6.8685	7.7933	282.66	2466.5
30.	69.124	0.0010223	5.228	5.229	289.30	2336.1	2625.4	0.9441	6.8254	7.7695	289.27	2468.6
35.	72.709	0.0010245	4.525	4.526	304.33	2327.2	2631.5	0.9878	6.7288	7.7166	304.29	2473.1
40.	75.886	0.0010265	3.992	3.993	317.65	2319.2	2636.9	1.0261	6.6448	7.6709	317.61	2477.1
45.	78.743	0.0010284	3.575	3.576	329.64	2312.0	2641.7	1.0603	6.5704	7.6307	329.59	2480.7
50.	81.345	0.0010301	3.239	3.240	340.56	2305.4	2646.0	1.0912	6.5035	7.5947	340.51	2484.0
55.	83.737	0.0010317	2.963	2.964	350.61	2299.3	2649.9	1.1194	6.4428	7.5623	350.56	2486.9
60.	85.954	0.0010333	2.731	2.732	359.93	2293.6	2653.6	1.1454	6.3873	7.5327	359.86	2489.7
65.	88.021	0.0010347	2.5335	2.5346	368.62	2288.3	2656.9	1.1696	6.3360	7.5055	368.55	2492.2
70.	89.959	0.0010361	2.3637	2.3647	376.77	2283.3	2660.1	1.1921	6.2883	7.4804	376.70	2494.5
75.	91.785	0.0010375	2.2158	2.2169	384.45	2278.6	2663.0	1.2131	6.2439	7.4570	384.37	2496.7
80.	93.512	0.0010387	2.0859	2.0870	391.72	2274.1	2665.8	1.2330	6.2022	7.4352	391.64	2498.8
90.	96.713	0.0010412	1.8682	1.8692	405.21	2265.6	2670.9	1.2696	6.1258	7.3954	405.11	2502.6
100.	99.632	0.0010434	1.6927	1.6937	417.51	2257.9	2675.4	1.3027	6.0571	7.3598	417.41	2506.1
110.	102.317	0.0010455	1.5482	1.5492	428.84	2250.8	2679.6	1.3330	5.9947	7.3277	428.73	2509.2
120.	104.808	0.0010476	1.4271	1.4281	439.36	2244.1	2683.4	1.3609	5.9375	7.2984	439.24	2512.1
130.	107.133	0.0010495	1.3240	1.3251	449.19	2237.8	2687.0	1.3868	5.8847	7.2715	449.05	2514.7
140.	109.315	0.0010513	1.2353	1.2363	458.42	2231.9	2690.3	1.4109	5.8356	7.2465	458.27	2517.2
150.	111.37	0.0010530	1.1580	1.1590	467.13	2226.2	2693.4	1.4336	5.7898	7.2234	466.97	2519.5
160.	113.32	0.0010547	1.0901	1.0911	475.38	2220.9	2696.2	1.4550	5.7467	7.2017	475.21	2521.7
180.	116.93	0.0010579	0.9762	0.9772	490.70	2210.8	2701.5	1.4944	5.6678	7.1622	490.51	2525.6
200.	120.23	0.0010608	0.8844	0.8854	504.70	2201.6	2706.3	1.5301	5.5967	7.1268	504.49	2529.2
220.	123.27	0.0010636	0.8088	0.8098	517.62	2193.0	2710.6	1.5627	5.5321	7.0949	517.39	2532.4
240.	126.09	0.0010663	0.7454	0.7465	529.63	2184.9	2714.5	1.5929	5.4728	7.0657	529.38	2535.4

PROPRIÉTES DE LA VAPEUR ET DE L'EAU SATURÉES (PRESSION)
TABLE 1

Press.	Temp.	Volume, m^3/kg			Enthalpie, kJ/kg			Entropie, kJ/kg K			Énergie, kJ/kg	
kPa	°C	Eau	Évap.	Vapeur	Eau	Évap.	Vapeur	Eau	Évap.	Vapeur	Eau	Vapeur
p	t	v_f	v_{fg}	v_g	h_f	h_{fg}	h_g	s_f	s_{fg}	s_g	U_f	U_g
240.	126.09	0.0010663	0.7454	0.7465	529.6	2184.9	2714.5	1.5929	5.4728	7.0657	529.38	2535.4
260.	128.73	0.0010688	0.6914	0.6925	540.9	2177.3	2718.2	1.6209	5.4180	7.0389	540.68	2538.1
280.	131.20	0.0010712	0.6450	0.6460	551.4	2170.1	2721.5	1.6471	5.3670	7.0140	551.14	2540.6
300.	133.54	0.0010735	0.6045	0.6056	561.4	2163.2	2724.7	1.6716	5.3193	6.9909	561.11	2543.0
350.	138.87	0.0010789	0.5229	0.5240	584.3	2147.4	2731.8	1.7273	5.2119	6.9392	583.89	2548.2
400.	143.62	0.0010839	0.4611	0.4622	604.7	2133.8	2737.6	1.7764	5.1179	6.8943	604.24	2552.7
450.	147.92	0.0010885	0.4127	0.4138	623.2	2119.7	2742.9	1.8204	5.0343	6.8547	622.67	2556.7
500.	151.84	0.0010928	0.3736	0.3747	640.1	2107.4	2747.5	1.8604	4.9588	6.8192	639.57	2560.2
550.	155.47	0.0010969	0.3414	0.3425	655.8	2095.9	2751.7	1.8970	4.8900	6.7870	655.20	2563.3
600.	158.84	0.0011009	0.3144	0.3155	670.4	2085.0	2755.5	1.9308	4.8267	6.7575	669.76	2566.2
650.	161.99	0.0011046	0.29138	0.29249	684.1	2074.7	2758.9	1.9623	4.7681	6.7304	683.42	2568.7
700.	164.96	0.0011082	0.27157	0.27268	697.1	2064.9	2762.0	1.9918	4.7134	6.7052	696.29	2571.1
750.	167.78	0.0011116	0.25431	0.25543	709.3	2055.5	2764.8	2.0195	4.6621	6.6817	708.47	2573.3
800.	170.41	0.0011150	0.23914	0.24026	720.9	2046.5	2767.5	2.0457	4.6139	6.6596	720.04	2575.3
900.	175.38	0.0011213	0.21369	0.21481	742.6	2029.5	2772.1	2.0941	4.5250	6.6192	741.63	2578.8
1000.	179.88	0.0011274	0.19317	0.19429	762.6	2013.6	2776.2	2.1382	4.4446	6.5828	761.48	2581.9
1100.	184.07	0.0011331	0.17629	0.17738	781.1	1998.5	2779.7	2.1786	4.3711	6.5497	779.88	2584.5
1200.	187.96	0.0011386	0.16206	0.16320	798.4	1984.3	2782.7	2.2161	4.3033	6.5194	797.06	2586.9
1300.	191.61	0.0011438	0.14998	0.15113	814.7	1970.7	2785.4	2.2510	4.2403	6.4913	813.21	2589.0
1400.	195.04	0.0011489	0.13987	0.14072	830.1	1957.7	2787.8	2.2837	4.1814	6.4651	828.47	2590.8
1500.	198.29	0.0011539	0.13050	0.13166	844.7	1945.2	2789.9	2.3145	4.1261	6.4406	842.93	2592.4
1600.	201.37	0.0011586	0.12253	0.12369	858.6	1933.2	2791.7	2.3436	4.0739	6.4175	856.71	2593.8
1800.	207.11	0.0011678	0.10915	0.11032	884.6	1910.3	2794.8	2.3976	3.9775	6.3751	882.47	2596.3
2000.	212.37	0.0011766	0.09836	0.09954	908.6	1888.4	2797.2	2.4469	3.8898	6.3367	906.24	2598.2
2200.	217.24	0.0011850	0.08947	0.09065	931.0	1868.1	2799.1	2.4922	3.8093	6.3015	928.39	2599.6
2400.	221.78	0.0011932	0.08201	0.08320	951.9	1848.5	2800.4	2.5343	3.7347	6.2690	949.07	2600.7
2600.	226.04	0.0012011	0.07565	0.07686	971.7	1829.6	2801.4	2.5736	3.6651	6.2387	968.60	2601.5
2800.	230.05	0.0012088	0.07018	0.07139	990.5	1811.5	2802.0	2.6106	3.5998	6.2104	987.10	2602.1
3000.	233.84	0.0012163	0.06541	0.06663	1008.4	1793.9	2802.3	2.6455	3.5382	6.1837	1004.70	2602.4
3500.	242.54	0.0012345	0.05579	0.05703	1049.8	1752.2	2802.0	2.7253	3.3976	6.1228	1045.44	2602.4
4000.	250.33	0.0012521	0.04850	0.04975	1087.4	1712.9	2800.3	2.7965	3.2720	6.0685	1082.4	2601.3
4500.	257.41	0.0012691	0.04277	0.04404	1122.1	1675.6	2797.7	2.8612	3.1579	6.0191	1116.4	2599.5
5000.	263.91	0.0012858	0.03814	0.03943	1154.5	1639.7	2794.2	2.9206	3.0529	5.9735	1148.0	2597.0
5500.	269.93	0.0013023	0.03433	0.03563	1184.9	1605.0	2789.9	2.9757	2.9552	5.9309	1177.7	2594.0
6000.	275.55	0.0013187	0.03112	0.03244	1213.7	1571.3	2785.0	3.0273	2.8635	5.8908	1205.8	2590.4
6500.	280.82	0.0013350	0.026384	0.029719	1241.1	1538.4	2779.5	3.0759	2.7768	5.8527	1232.5	2586.3
7000.	285.79	0.0013513	0.026022	0.027373	1267.4	1506.0	2773.5	3.1219	2.6943	5.8162	1258.0	2581.8
7500.	290.50	0.0013677	0.023959	0.025327	1292.7	1474.2	2766.9	3.1657	2.6153	5.7811	1282.4	2577.0
8000.	294.97	0.0013842	0.022141	0.023525	1317.1	1442.8	2759.9	3.2076	2.5395	5.7471	1306.0	2571.7
9000.	303.31	0.0014179	0.019078	0.020495	1363.7	1380.9	2744.6	3.2867	2.3953	5.6820	1351.0	2560.1
10000.	310.96	0.0014526	0.016589	0.018041	1408.0	1319.7	2727.7	3.3605	2.2593	5.6198	1393.9	2547.3
11000.	318.05	0.0014887	0.014517	0.016006	1450.6	1258.7	2709.3	3.4304	2.1291	5.5595	1434.2	2533.2
12000.	324.65	0.0015268	0.012756	0.014283	1491.8	1197.4	2689.2	3.4972	2.0030	5.5002	1473.4	2517.8
13000.	330.83	0.0015672	0.011230	0.012797	1532.0	1135.8	2667.8	3.5616	1.8792	5.4408	1511.6	2500.6
14000.	336.64	0.0016106	0.009884	0.011495	1571.6	1070.7	2642.4	3.6242	1.7560	5.3803	1549.1	2481.4
15000.	342.13	0.0016579	0.008682	0.010340	1611.0	1004.0	2615.0	3.6859	1.6320	5.3178	1586.1	2459.9
16000.	347.33	0.0017103	0.007597	0.009308	1650.5	934.3	2584.9	3.7471	1.5060	5.2531	1623.2	2436.8
17000.	352.26	0.0017696	0.006601	0.008371	1691.7	859.9	2551.6	3.8107	1.3748	5.1855	1661.6	2409.3
18000.	356.96	0.0018399	0.005658	0.007498	1734.8	779.1	2513.9	3.8765	1.2362	5.1128	1701.7	2378.9
19000.	361.43	0.0019260	0.004751	0.006678	1778.7	692.0	2470.6	3.9429	1.0903	5.0332	1742.1	2343.8
20000.	365.70	0.0020370	0.003840	0.005877	1826.5	591.9	2418.4	4.0149	0.9263	4.9412	1785.7	2300.8
21000.	369.78	0.0022015	0.002822	0.005023	1886.3	461.3	2347.6	4.1048	0.7175	4.8223	1840.0	2242.1
22000.	373.69	0.0026714	0.001056	0.003728	2011.1	184.5	2195.6	4.2947	0.2852	4.5799	1952.4	2113.8
22120.	374.15	0.00317	0.0	0.00317	2107.4	0.0	2107.4	4.4429	0.0	4.4429	2037.3	2037.3

PROPRIÉTÉS DE LA VAPEUR SURCHAUFFÉE ET DE L'EAU COMPRIMÉE (TEMPÉRATURE ET PRESSION)

TABLE 2

Température, t, °C

Press. p, kPa (t_s)		0.	20.	40.	60.	80.	100.	120.	140.	160.
	v	0.0010002	135,23	144,47	153,71	162,95	172,19	181,42	190,66	199,89
1,0	h	-0,0	2538,6	2575,9	2613,3	2650,9	2688,6	2726,5	2764,6	2802,9
(6,983)	s	-0,0002	9,0611	9,1842	9,3001	9,4096	9,5136	9,6125	9,7070	9,7975
	v	0,0010002	90,131	96,298	102,46	108,62	114,78	120,94	127,10	133,25
1,5	h	-0,0	2538,4	2575,8	2613,2	2650,8	2688,6	2726,5	2764,6	2802,9
(13,04)	s	-0,0002	8,8736	8,9968	9,1127	9,2223	9,3263	9,4253	9,5198	9,6103
	v	0,0010002	67,582	72,211	76,837	81,459	86,080	90,700	95,319	99,936
2,0	h	-0,0	2538,3	2575,6	2613,1	2650,7	2688,5	2726,4	2764,5	2802,8
(17,51)	s	-0,0002	8,7404	8,8637	8,9797	9,0894	9,1934	9,2924	9,3870	9,4779
	v	0,0010002	0,0010017	48,124	51,211	54,296	57,378	60,460	63,540	66,619
3,0	h	-0,0	83,9	2575,4	2612,9	2650,6	2688,4	2726,3	2764,5	2802,8
(24,10)	s	-0,0002	0,2963	8,6760	8,7922	8,9019	9,0060	9,1051	9,1997	9,2902
	v	0,0010002	0,0010017	36,081	38,398	40,714	43,027	45,339	47,650	49,961
4,0	h	-0,0	83,9	2575,2	2612,7	2650,4	2688,3	2726,2	2764,4	2802,7
(28,98)	s	-0,0002	0,2963	8,5426	8,6589	8,7688	8,8730	8,9721	9,0668	9,1573
	v	0,0010002	0,0010017	28,854	30,711	32,565	34,417	36,267	38,117	39,966
5,0	h	-0,0	83,9	2574,9	2612,6	2650,3	2688,1	2726,1	2764,3	2802,6
(32,90)	s	-0,0002	0,2963	8,4390	8,5555	8,6655	8,7698	8,8690	8,9636	9,0542
	v	0,0010002	0,0010017	24,037	25,586	27,132	28,676	30,219	31,761	33,302
6,0	h	-0,0	83,9	2574,7	2612,4	2650,1	2688,0	2726,0	2764,2	2802,6
(36,18)	s	-0,0002	0,2963	8,3543	8,4709	8,5810	8,6854	8,7846	8,8793	8,9700
	v	0,0010002	0,0010017	0,0010078	19,179	20,341	21,501	22,659	23,816	24,973
8,0	h	-0,0	83,9	167,5	2612,0	2649,8	2687,8	2725,8	2764,1	2802,4
(41,53)	s	-0,0002	0,2963	0,5721	8,3372	8,4476	8,5521	8,6515	8,7463	8,8370
	v	0,0010002	0,0010017	0,0010078	15,336	16,266	17,195	18,123	19,050	19,975
10,0	h	-0,0	83,9	167,5	2611,6	2649,5	2687,5	2725,6	2763,9	2802,3
(45,83)	s	-0,0002	0,2963	0,5721	8,2334	8,3439	8,4486	8,5481	8,6430	8,7338
	v	0,0010002	0,0010017	0,0010078	10,210	10,834	11,455	12,075	12,694	13,312
15,0	h	-0,0	83,9	167,5	2610,6	2648,8	2686,9	2725,1	2763,5	2802,0
(54,00)	s	-0,0002	0,2963	0,5721	8,0446	8,1551	8,2601	8,3599	8,4551	8,5460
	v	0,0010002	0,0010017	0,0010078	0,0010171	8,1172	8,5847	9,0508	9,516	9,980
20,0	h	-0,0	83,9	167,5	251,1	2648,0	2686,3	2724,6	2763,1	2801,6
(60,09)	s	-0,0002	0,2963	0,5721	0,8310	8,0206	8,1261	8,2262	8,3213	8,4127
	v	0,0010002	0,0010017	0,0010078	0,0010171	5,4007	5,7144	6,0267	6,3379	6,6483
30,0	h	-0,0	83,9	167,5	251,1	2646,5	2685,1	2723,6	2762,3	2801,0
(69,12)	s	-0,0002	0,2963	0,5721	0,8310	7,8308	7,9363	8,0370	8,1329	8,2243
	v	0,0010002	0,0010017	0,0010078	0,0010171	4,0424	4,2792	4,5146	4,7489	4,9825
40,0	h	-0,0	83,9	167,5	251,1	2644,9	2683,8	2722,6	2761,4	2800,3
(75,89)	s	-0,0002	0,2963	0,5721	0,8310	7,6937	7,8009	7,9023	7,9985	8,0903
	v	0,0010002	0,0010017	0,0010078	0,0010171	0,0010292	3,4181	3,6074	3,7955	3,9829
50,0	h	0,0	83,9	167,5	251,1	334,9	2682,6	2721,6	2760,6	2799,6
(81,35)	s	-0,0002	0,2963	0,5721	0,8310	1,0753	7,6953	7,7972	7,8940	7,9861
	v	0,0010002	0,0010017	0,0010078	0,0010171	0,0010292	2,8440	3,0025	3,1599	3,3165
60,0	h	0,0	83,9	167,5	251,1	334,9	2681,3	2720,6	2759,8	2798,9
(85,95)	s	-0,0001	0,2963	0,5721	0,8310	1,0752	7,6085	7,7111	7,8083	7,9008
	v	0,0010002	0,0010017	0,0010078	0,0010171	0,0010292	2,1262	2,2464	2,3654	2,4836
80,0	h	0,0	83,9	167,5	251,1	334,9	2678,8	2718,6	2758,1	2797,5
(93,51)	s	-0,0001	0,2963	0,5721	0,8310	1,0752	7,4703	7,5742	7,6723	7,7655
	v	0,0010002	0,0010017	0,0010078	0,0010171	0,0010292	1,6955	1,7927	1,8886	1,9838
100,0	h	0,1	84,0	167,5	251,2	335,0	2676,2	2716,5	2756,4	2796,2
(99,63)	s	-0,0001	0,2963	0,5721	0,8309	1,0752	7,3618	7,4670	7,5662	7,6601
	v	0,0010001	0,0010017	0,0010077	0,0010171	0,0010291	0,0010437	1,1876	1,2529	1,3173
150,0	h	0,1	84,0	167,6	251,2	335,0	419,1	2711,2	2752,2	2792,7
(111,4)	s	-0,0001	0,2963	0,5721	0,8309	1,0752	1,3068	7,2693	7,3709	7,4667
	v	0,0010001	0,0010016	0,0010077	0,0010171	0,0010291	0,0010437	0,0010606	0,9349	0,9840
200,0	h	0,2	84,0	167,6	251,2	335,0	419,1	503,7	2747,8	2789,1
(120,2)	s	-0,0001	0,2963	0,5720	0,8309	1,0752	1,3068	1,5276	7,2298	7,3275
	v	0,0010001	0,0010016	0,0010077	0,0010170	0,0010291	0,0010436	0,0010606	0,6167	0,6506
300,0	h	0,3	84,1	167,7	251,3	335,1	419,2	503,8	2738,8	2781,8
(133,5)	s	-0,0001	0,2962	0,5720	0,8308	1,0751	1,3067	1,5275	7,0254	7,1271
	v	0,0010000	0,0010015	0,0010076	0,0010170	0,0010290	0,0010436	0,0010605	0,0010800	0,4837
400,0	h	0,4	84,2	167,8	251,4	335,2	419,3	503,9	589,1	2774,2
(143,6)	s	-0,0001	0,2962	0,5720	0,8308	1,0750	1,3066	1,5274	1,7389	6,9805

PROPRIÉTÉS DE LA VAPEUR SURCHAUFFÉE ET DE L'EAU COMPRIMÉE (TEMPÉRATURE ET PRESSION)

TABLE 2

Température, t, °C

180.	200.	220.	240.	260.	280.	300.	320.	340.		Press. p, kPa
209.12	218.35	227.58	236.82	246.05	255.28	264.51	273.74	282.97	v	
2841.4	2880.1	2919.0	2958.1	2997.4	3037.0	3076.8	3116.9	3157.2	h	1.0
9.8843	9.9679	10.0484	10.1262	10.2014	10.2743	10.3450	10.4137	10.4805	s	
139.41	145.56	151.72	157.87	164.03	170.18	176.34	182.49	188.64	v	
2841.4	2880.0	2918.9	2958.1	2997.4	3037.0	3076.8	3116.9	3157.2	h	1.5
9.6972	9.7807	9.8612	9.9390	10.0142	10.0871	10.1578	10.2266	10.2934	s	
104.55	109.17	113.79	118.40	123.02	127.64	132.25	136.87	141.48	v	
2841.3	2880.0	2918.9	2958.0	2997.4	3037.0	3076.8	3116.9	3157.2	h	2.0
9.5843	9.6679	9.7284	9.8062	9.8814	9.9543	10.0251	10.0938	10.1606	s	
69.698	72.777	75.855	78.933	82.010	85.088	88.165	91.242	94.320	v	
2841.3	2880.0	2918.9	2958.0	2997.4	3037.0	3076.8	3116.9	3157.2	h	3.0
9.3771	9.4607	9.5412	9.6190	9.6943	9.7672	9.8379	9.9066	9.9735	s	
52.270	54.580	56.889	59.197	61.506	63.814	66.122	68.430	70.738	v	
2841.2	2879.9	2918.8	2958.0	2997.3	3036.9	3076.8	3116.8	3157.2	h	4.0
9.2443	9.3279	9.4084	9.4862	9.5615	9.6344	9.7051	9.7738	9.8407	s	
41.814	43.661	45.509	47.356	49.203	51.050	52.897	54.743	56.590	v	
2841.2	2879.9	2918.8	2957.9	2997.3	3036.9	3076.7	3116.8	3157.1	h	5.0
9.1412	9.2248	9.3054	9.3832	9.4584	9.5313	9.6021	9.6708	9.7377	s	
34.843	36.383	37.922	39.462	41.001	42.540	44.079	45.618	47.157	v	
2841.1	2879.8	2918.8	2957.9	2997.3	3036.9	3076.7	3116.8	3157.1	h	6.0
9.0569	9.1406	9.2212	9.2990	9.3742	9.4472	9.5179	9.5866	9.6535	s	
26.129	27.284	28.439	29.594	30.749	31.903	33.058	34.212	35.367	v	
2841.0	2879.7	2918.7	2957.8	2997.2	3036.8	3076.7	3116.8	3157.1	h	8.0
8.9240	9.0077	9.0883	9.1661	9.2414	9.3143	9.3851	9.4538	9.5207	s	
20.908	21.825	22.750	23.674	24.598	25.521	26.445	27.369	28.292	v	
2840.9	2879.6	2918.6	2957.8	2997.2	3036.8	3076.6	3116.7	3157.0	h	10.0
8.8208	8.9045	8.9852	9.0630	9.1383	9.2113	9.2820	9.3508	9.4177	s	
13.929	14.546	15.163	15.780	16.396	17.012	17.628	18.244	18.860	v	
2840.6	2879.4	2918.4	2957.6	2997.0	3036.6	3076.5	3116.6	3157.0	h	15.0
8.6332	8.7170	8.7977	8.8757	8.9510	9.0240	9.0948	9.1635	9.2304	s	
10.444	10.907	11.370	11.832	12.295	12.757	13.219	13.681	14.143	v	
2840.3	2879.2	2918.2	2957.4	2996.9	3036.5	3076.4	3116.5	3156.9	h	20.0
8.5000	8.5839	8.6647	8.7426	8.8180	8.8910	8.9618	9.0306	9.0975	s	
6.9582	7.2675	7.5766	7.8854	8.1940	8.5024	8.8108	9.1190	9.4272	v	
2839.8	2878.7	2917.8	2957.1	2996.6	3036.2	3076.1	3116.3	3156.7	h	30.0
8.3119	8.3960	8.4769	8.5550	8.6305	8.7035	8.7744	8.8432	8.9102	s	
5.2154	5.4478	5.6800	5.9118	6.1435	6.3751	6.6065	6.8378	7.0690	v	
2839.2	2878.2	2917.4	2956.7	2996.3	3036.0	3075.9	3116.1	3156.5	h	40.0
8.1782	8.2625	8.3435	8.4217	8.4973	8.5704	8.6413	8.7102	8.7772	s	
4.1697	4.3560	4.5420	4.7277	4.9133	5.0986	5.2839	5.4691	5.6542	v	
2838.6	2877.7	2917.0	2956.4	2995.9	3035.7	3075.7	3115.9	3156.3	h	50.0
8.0742	8.1587	8.2399	8.3182	8.3939	8.4671	8.5380	8.6070	8.6740	s	
3.4726	3.6281	3.7833	3.9383	4.0931	4.2477	4.4022	4.5566	4.7109	v	
2838.1	2877.3	2916.6	2956.0	2995.6	3035.4	3075.4	3115.6	3156.1	h	60.0
7.9891	8.0738	8.1552	8.2336	8.3093	8.3826	8.4536	8.5226	8.5896	s	
2.6011	2.7183	2.8350	2.9515	3.0678	3.1840	3.3000	3.4160	3.5319	v	
2836.9	2876.3	2915.8	2955.3	2995.0	3034.9	3075.0	3115.2	3155.7	h	80.0
7.8544	7.9395	8.0212	8.0998	8.1757	8.2491	8.3202	8.3893	8.4564	s	
2.0783	2.1723	2.2660	2.3595	2.4527	2.5458	2.6387	2.7316	2.8244	v	
2835.8	2875.4	2915.0	2954.6	2994.4	3034.4	3074.5	3114.8	3155.3	h	100.0
7.7495	7.8349	7.9169	7.9958	8.0719	8.1454	8.2166	8.2857	8.3529	s	
1.3811	1.4444	1.5073	1.5700	1.6325	1.6948	1.7570	1.8191	1.8812	v	
2832.9	2872.9	2912.9	2952.9	2992.9	3033.0	3073.3	3113.7	3154.3	h	150.0
7.5574	7.6439	7.7266	7.8061	7.8826	7.9565	8.0280	8.0973	8.1646	s	
1.0325	1.0804	1.1280	1.1753	1.2224	1.2693	1.3162	1.3629	1.4095	v	
2830.0	2870.5	2910.8	2951.1	2991.4	3031.7	3072.1	3112.6	3153.3	h	200.0
7.4196	7.5072	7.5907	7.6707	7.7477	7.8219	7.8937	7.9632	8.0307	s	
0.6837	0.7164	0.7486	0.7805	0.8123	0.8438	0.8753	0.9066	0.9379	v	
2824.0	2865.5	2906.6	2947.5	2988.2	3028.9	3069.7	3110.5	3151.4	h	300.0
7.2222	7.3119	7.3971	7.4783	7.5562	7.6311	7.7034	7.7734	7.8412	s	
0.5093	0.5343	0.5589	0.5831	0.6072	0.6311	0.6549	0.6785	0.7021	v	
2817.8	2860.4	2902.3	2943.9	2985.1	3026.2	3067.2	3108.3	3149.4	h	400.0
7.0788	7.1708	7.2576	7.3402	7.4190	7.4947	7.5675	7.6379	7.7061	s	

PROPRIÉTÉS DE LA VAPEUR SURCHAUFFÉE ET DE L'EAU COMPRIMÉE (TEMPÉRATURE ET PRESSION)

TABLE 2

Température, t, °C

Press. p, kPa (t_s)		360.	380.	400.	420.	440.	460.	480.	500.	520.
	v	292.20	301.43	310.66	319.89	329.12	338.35	347.58	356.81	366.04
1.0	h	3197.8	3238.6	3279.7	3321.1	3362.7	3404.6	3446.8	3489.2	3531.9
(6.983)	s	10.5457	10.6091	10.6711	10.7317	10.7909	10.8488	10.9056	10.9612	11.0157
	v	194.80	200.95	207.11	213.26	219.41	225.57	231.72	237.87	244.03
1.5	h	3197.8	3238.6	3279.7	3321.1	3362.7	3404.6	3446.8	3489.2	3531.9
(13.04)	s	10.3585	10.4220	10.4840	10.5445	10.6037	10.6617	10.7184	10.7741	10.8286
	v	146.10	150.71	155.33	159.94	164.56	169.17	173.79	178.41	183.02
2.0	h	3197.8	3238.6	3279.7	3321.1	3362.7	3404.6	3446.8	3489.2	3531.9
(17.51)	s	10.2257	10.2892	10.3512	10.4118	10.4710	10.5289	10.5857	10.6413	10.6958
	v	97.397	100.47	103.55	106.63	109.71	112.78	115.86	118.94	122.01
3.0	h	3197.8	3238.6	3279.7	3321.1	3362.7	3404.6	3446.8	3489.2	3531.9
(24.10)	s	10.0388	10.1021	10.1641	10.2246	10.2838	10.3418	10.3985	10.4541	10.5087
	v	73.046	75.354	77.662	79.970	82.278	84.586	86.893	89.201	91.509
4.0	h	3197.7	3238.6	3279.7	3321.0	3362.7	3404.6	3446.7	3489.2	3531.9
(28.98)	s	9.9058	9.9693	10.0313	10.0918	10.1510	10.2090	10.2657	10.3214	10.3759
	v	58.436	60.283	62.129	63.975	65.822	67.668	69.514	71.360	73.207
5.0	h	3197.7	3238.6	3279.7	3321.0	3362.7	3404.6	3446.7	3489.2	3531.9
(32.90)	s	9.8028	9.8663	9.9283	9.9888	10.0480	10.1060	10.1627	10.2184	10.2729
	v	48.696	50.235	51.773	53.312	54.851	56.389	57.928	59.467	61.005
6.0	h	3197.7	3238.5	3279.6	3321.0	3362.6	3404.5	3446.7	3489.2	3531.9
(36.18)	s	9.7186	9.7821	9.8441	9.9047	9.9639	10.0218	10.0786	10.1342	10.1888
	v	36.521	37.675	38.829	39.983	41.137	42.291	43.445	44.599	45.753
8.0	h	3197.7	3238.5	3279.6	3321.0	3362.6	3404.5	3446.7	3489.1	3531.9
(41.53)	s	9.5858	9.6493	9.7113	9.7719	9.8311	9.8890	9.9458	10.0014	10.0560
	v	29.216	30.139	31.062	31.986	32.909	33.832	34.756	35.679	36.602
10.0	h	3197.6	3238.5	3279.6	3321.0	3362.6	3404.5	3446.7	3489.1	3531.9
(45.83)	s	9.4828	9.5463	9.6083	9.6689	9.7281	9.7860	9.8428	9.8984	9.9530
	v	19.475	20.091	20.707	21.323	21.938	22.554	23.169	23.785	24.400
15.0	h	3197.5	3238.4	3279.5	3320.9	3362.5	3404.4	3446.6	3489.1	3531.8
(54.00)	s	9.2956	9.3591	9.4211	9.4817	9.5409	9.5988	9.6556	9.7112	9.7658
	v	14.605	15.067	15.529	15.991	16.453	16.914	17.376	17.838	18.300
20.0	h	3197.5	3238.3	3279.4	3320.8	3362.5	3404.4	3446.6	3489.0	3531.8
(60.09)	s	9.1627	9.2262	9.2882	9.3488	9.4081	9.4660	9.5228	9.5784	9.6330
	v	9.7353	10.043	10.351	10.659	10.967	11.275	11.583	11.891	12.199
30.0	h	3197.3	3238.2	3279.3	3320.7	3362.3	3404.2	3446.4	3488.9	3531.6
(69.12)	s	8.9754	9.0389	9.1010	9.1615	9.2208	9.2788	9.3355	9.3912	9.4458
	v	7.3002	7.5314	7.7625	7.9935	8.2246	8.4556	8.6866	8.9176	9.1485
40.0	h	3197.1	3238.0	3279.1	3320.5	3362.2	3404.1	3446.3	3488.8	3531.5
(75.89)	s	8.8424	8.9060	8.9680	9.0286	9.0879	9.1459	9.2027	9.2583	9.3129
	v	5.8392	6.0242	6.2091	6.3941	6.5790	6.7638	6.9487	7.1335	7.3183
50.0	h	3196.9	3237.8	3279.0	3320.4	3362.1	3404.0	3446.2	3488.7	3531.4
(81.35)	s	8.7392	8.8028	8.8649	8.9255	8.9848	9.0428	9.0996	9.1552	9.2098
	v	4.8652	5.0194	5.1736	5.3277	5.4819	5.6360	5.7900	5.9441	6.0981
60.0	h	3196.7	3237.7	3278.8	3320.2	3361.9	3403.9	3446.1	3488.6	3531.3
(85.95)	s	8.6549	8.7185	8.7806	8.8412	8.9005	8.9585	9.0153	9.0710	9.1256
	v	3.6477	3.7634	3.8792	3.9948	4.1105	4.2261	4.3418	4.4574	4.5729
80.0	h	3196.4	3237.3	3278.5	3320.0	3361.7	3403.6	3445.9	3488.4	3531.1
(93.51)	s	8.5217	8.5854	8.6475	8.7081	8.7675	8.8255	8.8823	8.9380	8.9926
	v	2.9172	3.0098	3.1025	3.1951	3.2877	3.3803	3.4728	3.5653	3.6578
100.0	h	3196.0	3237.0	3278.2	3319.7	3361.4	3403.4	3445.6	3488.1	3530.9
(99.63)	s	8.4183	8.4820	8.5442	8.6049	8.6642	8.7223	8.7791	8.8348	8.8894
	v	1.9431	2.0051	2.0669	2.1288	2.1906	2.2524	2.3142	2.3759	2.4377
150.0	h	3195.1	3236.2	3277.5	3319.0	3360.7	3402.8	3445.0	3487.6	3530.4
(111.4)	s	8.2301	8.2940	8.3562	8.4170	8.4764	8.5345	8.5914	8.6472	8.7018
	v	1.4561	1.5027	1.5492	1.5956	1.6421	1.6885	1.7349	1.7812	1.8276
200.0	h	3194.2	3235.4	3276.7	3318.3	3360.1	3402.1	3444.5	3487.0	3529.9
(120.2)	s	8.0964	8.1603	8.2226	8.2835	8.3429	8.4011	8.4581	8.5139	8.5686
	v	0.9691	1.0003	1.0314	1.0625	1.0935	1.1245	1.1556	1.1865	1.2175
300.0	h	3192.4	3233.7	3275.2	3316.8	3358.8	3400.9	3443.3	3486.0	3528.9
(133.5)	s	7.9072	7.9713	8.0338	8.0949	8.1545	8.2128	8.2698	8.3257	8.3805
	v	0.7256	0.7491	0.7725	0.7959	0.8192	0.8426	0.8659	0.8892	0.9125
400.0	h	3190.6	3232.1	3273.6	3315.4	3357.4	3399.7	3442.1	3484.9	3527.8
(143.6)	s	7.7723	7.8367	7.8994	7.9606	8.0203	8.0787	8.1359	8.1919	8.2468

PROPRIÉTÉS DE LA VAPEUR SURCHAUFFÉE ET DE L'EAU COMPRIMÉE (TEMPÉRATURE ET PRESSION)

TABLE 2

Température, t, °C

540.	560.	580.	600.	625.	650.	700.	750.	800.		Press. p, kPa
375.27	384.50	393.74	402.97	414.50	426.04	449.12	472.19	495.27	v	
3574.9	3618.2	3661.8	3705.6	3760.8	3816.4	3928.9	4043.0	4158.7	h	1.0
11.0693	11.1218	11.1735	11.2243	11.2866	11.3476	11.4663	11.5807	11.6911	s	
250.18	256.34	262.49	268.64	276.33	284.03	299.41	314.79	330.18	v	
3574.9	3618.2	3661.8	3705.6	3760.8	3816.4	3928.9	4043.0	4158.7	h	1.5
10.8821	10.9347	10.9864	11.0372	11.0995	11.1605	11.2792	11.3935	11.5040	s	
187.64	192.25	196.87	201.48	207.25	213.02	224.56	236.10	247.63	v	
3574.9	3618.2	3661.8	3705.6	3760.8	3816.4	3928.8	4043.0	4158.7	h	2.0
10.7494	10.8019	10.8536	10.9044	10.9667	11.0277	11.1464	11.2608	11.3712	s	
125.09	128.17	131.24	134.32	138.17	142.01	149.70	157.40	165.09	v	
3574.9	3618.2	3661.8	3705.6	3760.8	3816.4	3928.8	4043.0	4158.7	h	3.0
10.5622	10.6148	10.6665	10.7173	10.7796	10.8406	10.9593	11.0736	11.1841	s	
93.817	96.124	98.432	100.74	103.62	106.51	112.28	118.05	123.82	v	
3574.9	3618.2	3661.7	3705.6	3760.8	3816.4	3928.8	4043.0	4158.7	h	4.0
10.4295	10.4820	10.5337	10.5845	10.6468	10.7078	10.8265	10.9409	11.0513	s	
75.053	76.899	78.745	80.592	82.899	85.207	89.822	94.438	99.053	v	
3574.9	3618.2	3661.7	3705.6	3760.7	3816.3	3928.8	4043.0	4158.7	h	5.0
10.3265	10.3790	10.4307	10.4815	10.5438	10.6049	10.7235	10.8379	10.9483	s	
62.544	64.082	65.621	67.159	69.082	71.005	74.852	78.698	82.544	v	
3574.9	3618.2	3661.7	3705.6	3760.7	3816.3	3928.8	4043.0	4158.7	h	6.0
10.2423	10.2949	10.3466	10.3973	10.4596	10.5207	10.6394	10.7537	10.8642	s	
46.907	48.061	49.215	50.369	51.811	53.254	56.138	59.023	61.908	v	
3574.9	3618.2	3661.7	3705.5	3760.7	3816.3	3928.8	4043.0	4158.7	h	8.0
10.1095	10.1621	10.2138	10.2646	10.3269	10.3879	10.5066	10.6210	10.7314	s	
37.525	38.448	39.372	40.295	41.449	42.603	44.910	47.218	49.526	v	
3574.9	3618.1	3661.7	3705.5	3760.7	3816.3	3928.8	4042.9	4158.7	h	10.0
10.0065	10.0591	10.1108	10.1616	10.2239	10.2849	10.4036	10.5180	10.6284	s	
25.316	25.632	26.247	26.863	27.632	28.401	29.940	31.478	33.017	v	
3574.8	3618.1	3661.7	3705.5	3760.7	3816.3	3928.8	4042.9	4158.7	h	15.0
9.8194	9.8719	9.9236	9.9744	10.0367	10.0978	10.2164	10.3308	10.4413	s	
18.761	19.223	19.685	20.146	20.723	21.300	22.455	23.609	24.762	v	
3574.8	3618.0	3661.6	3705.4	3760.6	3816.2	3928.7	4042.9	4158.7	h	20.0
9.6865	9.7391	9.7908	9.8416	9.9039	9.9650	10.0836	10.1980	10.3085	s	
12.507	12.815	13.122	13.430	13.815	14.200	14.969	15.739	16.508	v	
3574.7	3618.0	3661.5	3705.4	3760.6	3816.2	3928.7	4042.8	4158.6	h	30.0
9.4993	9.5519	9.6036	9.6544	9.7167	9.7778	9.8965	10.0109	10.1213	s	
9.3795	9.6104	9.8413	10.072	10.361	10.649	11.227	11.804	12.381	v	
3574.6	3617.9	3661.4	3705.3	3760.5	3816.1	3928.6	4042.8	4158.6	h	40.0
9.3665	9.4191	9.4708	9.5216	9.5839	9.6450	9.7636	9.8780	9.9885	s	
7.5031	7.6878	7.8726	8.0574	8.2883	8.5192	8.9810	9.4427	9.9044	v	
3574.5	3617.8	3661.3	3705.2	3760.4	3816.0	3928.6	4042.7	4158.5	h	50.0
9.2634	9.3160	9.3677	9.4185	9.4808	9.5419	9.6606	9.7750	9.8855	s	
6.2521	6.4062	6.5602	6.7141	6.9066	7.0991	7.4839	7.8687	8.2535	v	
3574.4	3617.7	3661.3	3705.1	3760.3	3816.0	3928.5	4042.7	4158.5	h	60.0
9.1792	9.2318	9.2835	9.3343	9.3966	9.4577	9.5764	9.6908	9.8013	s	
4.6885	4.8040	4.9196	5.0351	5.1795	5.3239	5.6128	5.9013	6.1899	v	
3574.2	3617.5	3661.1	3705.0	3760.2	3815.8	3928.4	4042.6	4158.4	h	80.0
9.0462	9.0988	9.1506	9.2014	9.2637	9.3248	9.4436	9.5580	9.6685	s	
3.7503	3.8428	3.9352	4.0277	4.1432	4.2588	4.4898	4.7208	4.9517	v	
3574.0	3617.3	3660.9	3704.8	3760.0	3815.7	3928.2	4042.5	4158.3	h	100.0
8.9431	8.9957	9.0474	9.0982	9.1606	9.2217	9.3405	9.4549	9.5654	s	
2.4994	2.5611	2.6228	2.6845	2.7616	2.8386	2.9927	3.1468	3.3008	v	
3573.5	3616.9	3660.5	3704.4	3759.6	3815.3	3927.9	4042.2	4158.0	h	150.0
8.7555	8.8082	8.8599	8.9108	8.9732	9.0343	9.1531	9.2676	9.3781	s	
1.8739	1.9202	1.9666	2.0129	2.0707	2.1286	2.2442	2.3598	2.4754	v	
3573.0	3616.4	3660.0	3704.0	3759.3	3815.0	3927.6	4041.9	4157.8	h	200.0
8.6223	8.6750	8.7268	8.7776	8.8401	8.9012	9.0201	9.1346	9.2452	s	
1.2485	1.2794	1.3103	1.3412	1.3799	1.4185	1.4957	1.5729	1.6499	v	
3572.0	3615.5	3659.2	3703.2	3758.5	3814.2	3927.0	4041.4	4157.3	h	300.0
8.4343	8.4870	8.5389	8.5898	8.6523	8.7135	8.8325	8.9471	9.0577	s	
0.9357	0.9590	0.9822	1.0054	1.0344	1.0634	1.1214	1.1793	1.2372	v	
3571.1	3614.6	3658.3	3702.3	3757.7	3813.5	3926.4	4040.8	4156.9	h	400.0
8.3006	8.3534	8.4053	8.4563	8.5189	8.5802	8.6992	8.8139	8.9246	s	

PROPRIÉTÉS DE LA VAPEUR SURCHAUFFÉE ET DE L'EAU COMPRIMÉE (TEMPÉRATURE ET PRESSION)

TABLE 2

Température, t, °C

Press. p, kPa (t_s)		0.	20.	40.	60.	80.	100.	120.	140.	160.
	v	0.0010000	0.0010015	0.0010076	0.0010169	0.0010290	0.0010435	0.0010605	0.0010800	0.38347
500.0	h	0.5	84.3	167.9	251.5	335.3	419.4	503.9	589.2	2766.4
(151.8)	s	-0.0001	0.2962	0.5719	0.8307	1.0790	1.3066	1.5273	1.7388	6.8631
	v	0.0009999	0.0010015	0.0010075	0.0010169	0.0010289	0.0010434	0.0010604	0.0010799	0.31659
600.0	h	0.6	84.4	168.0	251.6	335.4	419.4	504.0	589.3	2758.2
(158.8)	s	-0.0001	0.2962	0.5719	0.8307	1.0789	1.3065	1.5272	1.7387	6.7648
	v	0.0009998	0.0010014	0.0010075	0.0010168	0.0010288	0.0010433	0.0010603	0.0010798	0.0011021
800.0	h	0.8	84.6	168.2	251.7	335.5	419.6	504.1	589.4	675.6
(170.4)	s	-0.0001	0.2961	0.5718	0.8306	1.0788	1.3063	1.5270	1.7385	1.9423
	v	0.0009997	0.0010013	0.0010074	0.0010167	0.0010287	0.0010432	0.0010602	0.0010796	0.0011019
1000.0	h	1.0	84.8	168.3	251.9	335.7	419.7	504.3	589.5	675.7
(179.9)	s	-0.0001	0.2961	0.5717	0.8305	1.0786	1.3062	1.5269	1.7383	1.9420
	v	0.0009993	0.0010010	0.0010071	0.0010165	0.0010285	0.0010430	0.0010599	0.0010793	0.0011016
1500.0	h	1.5	85.3	168.8	252.3	336.1	420.1	504.6	589.8	676.0
(198.3)	s	-0.0000	0.2960	0.5715	0.8302	1.0783	1.3058	1.5264	1.7378	1.9414
	v	0.0009992	0.0010008	0.0010069	0.0010162	0.0010282	0.0010427	0.0010596	0.0010790	0.0011012
2000.0	h	2.0	85.7	169.2	252.7	336.5	420.5	505.0	590.2	676.3
(212.4)	s	0.0000	0.2959	0.5713	0.8299	1.0780	1.3054	1.5260	1.7373	1.9408
	v	0.0009987	0.0010004	0.0010065	0.0010158	0.0010278	0.0010422	0.0010590	0.0010783	0.0011005
3000.0	h	3.0	86.7	170.1	253.6	337.3	421.2	505.7	590.8	676.9
(233.8)	s	0.0001	0.2957	0.5709	0.8294	1.0773	1.3046	1.5251	1.7362	1.9396
	v	0.0009982	0.0009999	0.0010060	0.0010153	0.0010273	0.0010417	0.0010584	0.0010777	0.0010997
4000.0	h	4.0	87.6	171.0	254.4	338.1	422.0	506.4	591.5	677.5
(250.3)	s	0.0002	0.2955	0.5706	0.8289	1.0726	1.3038	1.5242	1.7352	1.9385
	v	0.0009977	0.0009995	0.0010056	0.0010149	0.0010268	0.0010412	0.0010579	0.0010771	0.0010990
5000.0	h	5.1	88.6	171.9	255.3	338.8	422.7	507.1	592.1	678.1
(263.9)	s	0.0002	0.2952	0.5702	0.8283	1.0720	1.3030	1.5233	1.7342	1.9373
	v	0.0009972	0.0009990	0.0010052	0.0010144	0.0010263	0.0010406	0.0010573	0.0010764	0.0010983
6000.0	h	6.1	89.5	172.7	256.1	339.6	423.5	507.8	592.8	678.6
(275.5)	s	0.0003	0.2950	0.5698	0.8278	1.0713	1.3023	1.5224	1.7332	1.9361
	v	0.0009962	0.0009981	0.0010043	0.0010135	0.0010254	0.0010396	0.0010562	0.0010752	0.0010968
8000.0	h	8.1	91.4	174.5	257.8	341.2	425.0	509.2	594.1	679.8
(295.0)	s	0.0004	0.2946	0.5690	0.8267	1.0700	1.3007	1.5206	1.7311	1.9338
	v	0.0009953	0.0009972	0.0010034	0.0010127	0.0010245	0.0010386	0.0010551	0.0010739	0.0010954
10000.0	h	10.1	93.2	176.3	259.4	342.8	426.5	510.6	595.4	681.0
(311.0)	s	0.0005	0.2942	0.5682	0.8257	1.0687	1.2992	1.5188	1.7291	1.9315
	v	0.0009928	0.0009950	0.0010013	0.0010105	0.0010221	0.0010361	0.0010523	0.0010709	0.0010919
15000.0	h	15.1	97.9	180.7	263.6	346.8	430.3	514.2	598.7	684.0
(342.1)	s	0.0007	0.2931	0.5663	0.8230	1.0655	1.2954	1.5144	1.7241	1.9258
	v	0.0009904	0.0009929	0.0009992	0.0010083	0.0010199	0.0010337	0.0010497	0.0010679	0.0010886
20000.0	h	20.1	102.5	185.1	267.8	350.8	434.0	517.7	602.0	687.1
(365.7)	s	0.0008	0.2919	0.5643	0.8204	1.0623	1.2916	1.5101	1.7192	1.9203
	v	0.0009857	0.0009886	0.0009951	0.0010041	0.0010155	0.0010289	0.0010445	0.0010621	0.0010821
30000.0	h	30.0	111.7	193.8	276.1	358.7	441.6	524.9	608.7	693.3
	s	0.0008	0.2895	0.5604	0.8153	1.0560	1.2843	1.5017	1.7097	1.9095
	v	0.0009811	0.0009845	0.0009910	0.0010001	0.0010112	0.0010244	0.0010395	0.0010567	0.0010760
40000.0	h	39.7	120.8	202.5	284.5	366.7	449.2	532.1	615.5	699.6
	s	0.0004	0.2870	0.5565	0.8102	1.0498	1.2771	1.4935	1.7004	1.8991
	v	0.0009767	0.0009804	0.0009872	0.0009961	0.0010071	0.0010200	0.0010347	0.0010514	0.0010701
50000.0	h	49.3	129.9	211.2	292.8	374.7	456.8	539.4	622.4	705.9
	s	-0.0002	0.2843	0.5525	0.8052	1.0438	1.2701	1.4856	1.6919	1.8890
	v	0.0009723	0.0009765	0.0009834	0.0009923	0.0010031	0.0010157	0.0010301	0.0010464	0.0010645
60000.0	h	58.8	138.9	219.8	301.1	382.6	464.5	546.6	629.2	712.4
	s	-0.0012	0.2815	0.5486	0.8002	1.0379	1.2633	1.4778	1.6828	1.8793
	v	0.0009641	0.0009689	0.0009760	0.0009849	0.0009954	0.0010076	0.0010214	0.0010368	0.0010540
80000.0	h	77.5	156.6	236.9	317.6	398.5	479.7	561.3	643.2	725.5
	s	-0.0037	0.2756	0.5406	0.7904	1.0264	1.2501	1.4629	1.6661	1.8607
	v	0.0009565	0.0009616	0.0009690	0.0009779	0.0009882	0.0009999	0.0010132	0.0010279	0.0010443
100000.0	h	95.9	174.0	253.8	334.0	414.4	495.1	576.0	657.2	738.9
	s	-0.0067	0.2692	0.5325	0.7808	1.0152	1.2373	1.4486	1.6502	1.8431

PROPRIÉTÉS DE LA VAPEUR SURCHAUFFÉE ET DE L'EAU COMPRIMÉE (TEMPÉRATURE ET PRESSION)

TABLE 2

Température, t, °C

180.	200.	220.	240.	260.	280.	300.	320.	340.		Press. p, kPa
0.4045	0.4250	0.4450	0.4647	0.4841	0.5034	0.5226	0.5416	0.5606	v	
2811.4	2855.1	2898.0	2940.1	2981.9	3023.4	3064.8	3106.1	3147.4	h	500.0
6.9647	7.0592	7.1478	7.2317	7.3115	7.3879	7.4614	7.5322	7.6008	s	
0.3346	0.3520	0.3690	0.3857	0.4021	0.4183	0.4344	0.4504	0.4663	v	
2804.8	2849.7	2893.5	2936.4	2978.7	3020.6	3062.3	3103.9	3145.4	h	600.0
6.8691	6.9662	7.0567	7.1419	7.2228	7.3000	7.3740	7.4454	7.5143	s	
0.2471	0.2608	0.2740	0.2869	0.2995	0.3119	0.3241	0.3363	0.3483	v	
2791.1	2838.6	2884.2	2928.6	2972.1	3014.9	3057.3	3099.4	3141.4	h	800.0
6.7122	6.8148	6.9094	6.9976	7.0807	7.1595	7.2348	7.3070	7.3767	s	
0.1944	0.2059	0.2169	0.2276	0.2379	0.2480	0.2580	0.2678	0.2776	v	
2776.5	2826.8	2874.6	2920.6	2965.2	3009.0	3052.1	3094.9	3137.4	h	1000.0
6.5835	6.6922	6.7911	6.8825	6.9680	7.0485	7.1251	7.1984	7.2689	s	
0.0011271	0.1324	0.1406	0.1483	0.1556	0.1628	0.1697	0.1765	0.1832	v	
763.4	2794.7	2848.6	2899.2	2947.3	2993.7	3038.9	3083.3	3127.0	h	1500.0
2.1386	6.4508	6.5624	6.6630	6.7550	6.8405	6.9207	6.9967	7.0693	s	
0.0011267	0.0011560	0.1021	0.1084	0.1144	0.1200	0.1255	0.1308	0.1360	v	
763.6	852.6	2819.9	2875.9	2928.1	2977.5	3025.0	3071.2	3116.3	h	2000.0
2.1379	2.3300	6.3829	6.4943	6.5941	6.6852	6.7696	6.8487	6.9235	s	
0.0011258	0.0011550	0.0011891	0.06816	0.07283	0.07712	0.08116	0.08500	0.08871	v	
764.1	853.0	943.9	2822.9	2885.1	2942.0	2995.1	3045.4	3093.9	h	3000.0
2.1366	2.3284	2.5165	6.2241	6.3432	6.4479	6.5422	6.6285	6.7088	s	
0.0011249	0.0011540	0.0011878	0.0012280	0.05172	0.05544	0.05883	0.06200	0.06499	v	
764.6	853.4	944.1	1037.7	2835.6	2902.0	2962.0	3017.5	3069.8	h	4000.0
2.1352	2.3268	2.5147	2.7006	6.1353	6.2576	6.3642	6.4593	6.5461	s	
0.0011241	0.0011530	0.0011866	0.0012264	0.0012750	0.04222	0.04530	0.04810	0.05070	v	
765.2	853.8	944.4	1037.8	1134.9	2856.9	2925.5	2987.2	3044.1	h	5000.0
2.1339	2.3253	2.5129	2.6984	2.8840	6.0886	6.2105	6.3163	6.4106	s	
0.0011232	0.0011519	0.0011853	0.0012249	0.0012729	0.03317	0.03614	0.03874	0.04111	v	
765.7	854.2	944.7	1037.9	1134.7	2804.9	2885.0	2954.2	3016.5	h	6000.0
2.1325	2.3237	2.5110	2.6962	2.8813	5.9270	6.0692	6.1880	6.2913	s	
0.0011216	0.0011500	0.0011829	0.0012218	0.0012687	0.0013277	0.02426	0.02681	0.02896	v	
766.7	855.1	945.3	1038.1	1134.5	1236.0	2786.8	2878.7	2955.3	h	8000.0
2.1299	2.3206	2.5075	2.6919	2.8761	3.0629	5.7942	5.9519	6.0790	s	
0.0011199	0.0011480	0.0011805	0.0012188	0.0012648	0.0013221	0.0013979	0.01926	0.02147	v	
767.8	855.9	945.9	1038.4	1134.2	1235.0	1343.4	2783.5	2883.4	h	10000.0
2.1272	2.3176	2.5039	2.6877	2.8709	3.0563	3.2488	5.7145	5.8803	s	
0.0011159	0.0011433	0.0011748	0.0012115	0.0012553	0.0013090	0.0013779	0.0014736	0.0016324	v	
770.4	858.1	947.6	1039.2	1134.0	1232.9	1338.3	1454.3	1593.3	h	15000.0
2.1208	2.3102	2.4953	2.6775	2.8585	3.0407	3.2278	3.4267	3.6571	s	
0.0011120	0.0011387	0.0011693	0.0012047	0.0012466	0.0012971	0.0013606	0.0014451	0.0015704	v	
773.1	860.4	949.3	1040.3	1134.0	1231.4	1334.3	1445.6	1572.4	h	20000.0
2.1145	2.3030	2.4869	2.6677	2.8468	3.0262	3.2089	3.3998	3.6100	s	
0.0011046	0.0011301	0.0011590	0.0011922	0.0012307	0.0012763	0.0013316	0.0014012	0.0014939	v	
778.7	865.2	953.1	1042.8	1134.7	1229.7	1328.7	1433.6	1547.7	h	30000.0
2.1022	2.2891	2.4710	2.6492	2.8250	2.9998	3.1757	3.3556	3.5447	s	
0.0010976	0.0011220	0.0011495	0.0011808	0.0012166	0.0012583	0.0013077	0.0013677	0.0014434	v	
784.4	870.2	957.2	1045.8	1136.3	1229.2	1325.4	1425.9	1532.9	h	40000.0
2.0905	2.2758	2.4560	2.6320	2.8050	2.9761	3.1469	3.3193	3.4965	s	
0.0010910	0.0011144	0.0011407	0.0011703	0.0012040	0.0012426	0.0012874	0.0013406	0.0014055	v	
790.2	875.4	961.6	1049.2	1138.5	1229.8	1323.7	1421.0	1523.0	h	50000.0
2.0793	2.2632	2.4417	2.6158	2.7864	2.9545	3.1213	3.2882	3.4572	s	
0.0010847	0.0011073	0.0011325	0.0011607	0.0011924	0.0012285	0.0012698	0.0013179	0.0013791	v	
796.2	880.8	966.3	1053.0	1141.2	1231.1	1323.2	1418.0	1516.3	h	60000.0
2.0684	2.2511	2.4281	2.6005	2.7690	2.9345	3.0981	3.2606	3.4236	s	
0.0010731	0.0010941	0.0011174	0.0011433	0.0011720	0.0012041	0.0012401	0.0012809	0.0013280	v	
808.4	891.9	976.2	1061.4	1147.8	1235.4	1324.7	1415.7	1508.6	h	80000.0
2.0478	2.2281	2.4026	2.5720	2.7370	2.8985	3.0570	3.2130	3.3671	s	
0.0010623	0.0010821	0.0011039	0.0011279	0.0011543	0.0011833	0.0012155	0.0012514	0.0012921	v	
820.9	903.5	986.7	1070.7	1155.6	1241.5	1328.7	1416.9	1505.9	h	100000.0
2.0283	2.2067	2.3789	2.5458	2.7081	2.8663	3.0210	3.1723	3.3200	s	

PROPRIÉTÉS DE LA VAPEUR SURCHAUFFÉE ET DE L'EAU COMPRIMÉE (TEMPÉRATURE ET PRESSION)

TABLE 2

Press. p, kPa (t_s) — Température, t, °C

		360.	380.	400.	420.	440.	460.	480.	500.	520.
	v	0.5795	0.5984	0.6172	0.6359	0.6547	0.6734	0.6921	0.7108	0.7294
500.0	h	3188.8	3230.4	3272.1	3314.0	3356.1	3398.4	3441.0	3483.8	3526.8
(151.8)	s	7.6673	7.7319	7.7948	7.8561	7.9160	7.9745	8.0318	8.0879	8.1428
	v	0.4821	0.4979	0.5136	0.5293	0.5450	0.5606	0.5762	0.5918	0.6074
600.0	h	3187.0	3228.7	3270.6	3312.6	3354.8	3397.2	3439.8	3482.7	3525.8
(158.8)	s	7.5810	7.6459	7.7090	7.7705	7.8305	7.8891	7.9465	8.0027	8.0577
	v	0.3603	0.3723	0.3842	0.3960	0.4078	0.4196	0.4314	0.4432	0.4549
800.0	h	3183.4	3225.4	3267.5	3309.7	3352.1	3394.7	3437.5	3480.5	3523.7
(170.4)	s	7.4441	7.5094	7.5729	7.6347	7.6950	7.7539	7.8115	7.8679	7.9230
	v	0.2873	0.2969	0.3065	0.3160	0.3256	0.3350	0.3445	0.3540	0.3634
1000.0	h	3179.7	3222.0	3264.4	3306.9	3349.5	3392.2	3435.1	3478.3	3521.6
(179.9)	s	7.3368	7.4027	7.4665	7.5287	7.5893	7.6484	7.7062	7.7627	7.8181
	v	0.1898	0.1964	0.2029	0.2094	0.2158	0.2223	0.2287	0.2350	0.2414
1500.0	h	3170.4	3213.5	3256.6	3299.7	3342.8	3386.0	3429.3	3472.8	3516.5
(198.3)	s	7.1389	7.2060	7.2709	7.3340	7.3953	7.4550	7.5133	7.5703	7.6261
	v	0.1411	0.1461	0.1511	0.1561	0.1610	0.1659	0.1707	0.1756	0.1804
2000.0	h	3160.8	3204.9	3248.7	3292.4	3336.0	3379.7	3423.4	3467.3	3511.3
(212.4)	s	6.9950	7.0635	7.1296	7.1935	7.2555	7.3159	7.3748	7.4323	7.4885
	v	0.09232	0.09584	0.09931	0.1027	0.1061	0.1095	0.1128	0.1161	0.1194
3000.0	h	3140.9	3187.0	3232.5	3277.5	3322.3	3367.0	3411.6	3456.2	3500.9
(233.8)	s	6.7844	6.8561	6.9246	6.9906	7.0543	7.1160	7.1760	7.2345	7.2916
	v	0.06787	0.07066	0.07338	0.07604	0.07866	0.08125	0.08381	0.08634	0.08886
4000.0	h	3119.9	3168.4	3215.7	3262.3	3308.3	3354.0	3399.6	3445.0	3490.4
(250.3)	s	6.6265	6.7019	6.7733	6.8414	6.9069	6.9702	7.0314	7.0909	7.1489
	v	0.05316	0.05551	0.05779	0.06001	0.06218	0.06431	0.06642	0.06849	0.07055
5000.0	h	3097.6	3148.8	3198.3	3246.5	3294.0	3340.9	3387.4	3433.7	3479.8
(263.9)	s	6.4966	6.5762	6.6508	6.7215	6.7890	6.8538	6.9164	6.9770	7.0360
	v	0.04330	0.04539	0.04738	0.04931	0.05118	0.05302	0.05482	0.05659	0.05834
6000.0	h	3074.0	3128.3	3180.1	3230.3	3279.3	3327.4	3375.0	3422.2	3469.1
(275.5)	s	6.3836	6.4680	6.5462	6.6196	6.6893	6.7559	6.8199	6.8818	6.9417
	v	0.03088	0.03265	0.03431	0.03589	0.03740	0.03887	0.04030	0.04170	0.04308
8000.0	h	3022.7	3084.2	3141.6	3196.2	3248.7	3299.7	3349.6	3398.8	3447.4
(295.0)	s	6.1872	6.2828	6.3694	6.4493	6.5240	6.5945	6.6617	6.7262	6.7883
	v	0.02331	0.02493	0.02641	0.02779	0.02911	0.03036	0.03158	0.03276	0.03391
10000.0	h	2964.8	3035.7	3099.9	3159.7	3216.2	3270.5	3323.2	3374.6	3425.1
(311.0)	s	6.0110	6.1213	6.2182	6.3057	6.3861	6.4612	6.5321	6.5994	6.6640
	v	0.01256	0.01428	0.01566	0.01686	0.01794	0.01895	0.01989	0.02080	0.02166
15000.0	h	2770.8	2887.7	2979.1	3057.0	3126.9	3191.5	3252.4	3310.6	3366.8
(342.1)	s	5.5677	5.7497	5.8876	6.0016	6.1010	6.1904	6.2724	6.3487	6.4204
	v	0.0018269	0.008246	0.009947	0.01120	0.01224	0.01315	0.01399	0.01477	0.01551
20000.0	h	1742.9	2660.2	2820.5	2932.9	3023.7	3102.7	3174.4	3241.1	3304.2
(365.7)	s	3.8835	5.3165	5.5585	5.7232	5.8523	5.9616	6.0581	6.1456	6.2262
	v	0.0016285	0.001874	0.002831	0.004921	0.006227	0.007189	0.007985	0.008681	0.009310
30000.0	h	1678.0	1837.7	2161.8	2558.0	2754.0	2887.7	2993.9	3085.0	3166.6
	s	3.7541	4.0021	4.4896	5.0706	5.3499	5.5349	5.6779	5.7972	5.9014
	v	0.0015425	0.001682	0.001909	0.002371	0.003200	0.004137	0.004941	0.005616	0.006205
40000.0	h	1650.5	1776.4	1934.1	2145.7	2399.4	2617.1	2779.8	2906.8	3013.7
	s	3.6856	3.8814	4.1190	4.4285	4.7893	5.0906	5.3097	5.4762	5.6128
	v	0.0014862	0.001589	0.001729	0.001938	0.002269	0.002747	0.003308	0.003882	0.004408
50000.0	h	1633.9	1746.8	1877.7	2026.6	2199.7	2387.2	2564.9	2723.0	2854.9
	s	3.6355	3.8110	4.0083	4.2262	4.4723	4.7316	4.9709	5.1782	5.3466
	v	0.0014444	0.001528	0.001632	0.001771	0.001962	0.002226	0.002565	0.002952	0.003358
60000.0	h	1622.8	1728.4	1847.3	1975.0	2113.5	2263.2	2418.8	2570.6	2712.6
	s	3.5948	3.7589	3.9383	4.1252	4.3221	4.5291	4.7385	4.9374	5.1189
	v	0.0013833	0.001445	0.001518	0.001605	0.001710	0.001841	0.001999	0.002188	0.002405
80000.0	h	1609.7	1707.0	1814.2	1924.1	2036.6	2152.5	2272.8	2397.4	2524.0
	s	3.5296	3.6807	3.8425	4.0033	4.1633	4.3237	4.4855	4.6488	4.8104
	v	0.0013388	0.001390	0.001446	0.001511	0.001587	0.001675	0.001777	0.001893	0.002024
100000.0	h	1603.4	1696.3	1797.6	1899.0	2000.3	2102.7	2207.7	2316.1	2427.2
	s	3.4767	3.6211	3.7738	3.9223	4.0664	4.2079	4.3492	4.4913	4.6331

PROPRIÉTÉS DE LA VAPEUR SURCHAUFFÉE ET DE L'EAU COMPRIMÉE (TEMPÉRATURE ET PRESSION)

TABLE 2

Température, t, °C

540.	560.	580.	600.	625.	650.	700.	750.	800.		Press. p, kPa
0.7481	0.7667	0.7853	0.8039	0.8272	0.8504	0.8968	0.9432	0.9896	v	
3570.1	3613.6	3657.4	3701.5	3757.0	3812.8	3925.8	4040.3	4156.4	h	500.0
8.1967	8.2496	8.3016	8.3526	8.4152	8.4766	8.5957	8.7105	8.8213	s	
0.6230	0.6386	0.6541	0.6696	0.6890	0.7084	0.7471	0.7858	0.8245	v	
3569.1	3612.7	3656.6	3700.7	3756.2	3812.1	3925.1	4039.8	4155.9	h	600.0
8.1117	8.1647	8.2167	8.2678	8.3305	8.3919	8.5111	8.6259	8.7368	s	
0.4666	0.4783	0.4900	0.5017	0.5163	0.5309	0.5600	0.5891	0.6181	v	
3567.2	3610.9	3654.8	3699.1	3754.7	3810.7	3923.9	4038.7	4155.0	h	800.0
7.9771	8.0302	8.0824	8.1336	8.1964	8.2579	8.3773	8.4923	8.6033	s	
0.3728	0.3822	0.3916	0.4010	0.4127	0.4244	0.4477	0.4710	0.4943	v	
3565.2	3609.0	3653.1	3697.4	3753.1	3809.3	3922.7	4037.4	4154.1	h	1000.0
7.8724	7.9256	7.9779	8.0292	8.0921	8.1537	8.2734	8.3885	8.4997	s	
0.2477	0.2540	0.2604	0.2667	0.2745	0.2824	0.2980	0.3136	0.3292	v	
3560.4	3604.5	3648.8	3693.3	3749.3	3805.7	3919.6	4034.9	4151.7	h	1500.0
7.6808	7.7343	7.7869	7.8385	7.9017	7.9636	8.0838	8.1993	8.3108	s	
0.1852	0.1900	0.1947	0.1995	0.2054	0.2114	0.2232	0.2349	0.2467	v	
3555.5	3599.9	3644.4	3689.2	3745.5	3802.1	3916.5	4032.2	4149.4	h	2000.0
7.5435	7.5974	7.6503	7.7022	7.7657	7.8279	7.9485	8.0645	8.1763	s	
0.1226	0.1259	0.1291	0.1323	0.1364	0.1404	0.1483	0.1562	0.1641	v	
3545.7	3590.6	3635.7	3681.0	3737.8	3795.0	3910.3	4026.8	4144.7	h	3000.0
7.3474	7.4020	7.4554	7.5079	7.5721	7.6349	7.7564	7.8733	7.9857	s	
0.09135	0.09384	0.09631	0.09876	0.1018	0.1049	0.1109	0.1169	0.1229	v	
3535.8	3581.4	3627.0	3672.8	3730.2	3787.9	3904.1	4021.4	4140.0	h	4000.0
7.2055	7.2608	7.3149	7.3680	7.4328	7.4961	7.6187	7.7363	7.8495	s	
0.07259	0.07461	0.07662	0.07862	0.08109	0.08356	0.08845	0.09329	0.09809	v	
3525.9	3572.0	3618.2	3664.5	3722.5	3780.7	3897.9	4016.1	4135.3	h	5000.0
7.0934	7.1494	7.2042	7.2578	7.3233	7.3872	7.5108	7.6292	7.7431	s	
0.06008	0.06179	0.06349	0.06518	0.06728	0.06936	0.07348	0.07755	0.08159	v	
3515.9	3562.7	3609.4	3656.2	3714.8	3773.5	3891.7	4010.7	4130.7	h	6000.0
7.0000	7.0568	7.1122	7.1664	7.2321	7.2971	7.4217	7.5409	7.6554	s	
0.04443	0.04577	0.04709	0.04839	0.05001	0.05161	0.05477	0.05788	0.06096	v	
3495.7	3543.8	3591.7	3639.5	3699.3	3759.2	3879.2	3999.9	4121.3	h	8000.0
6.8484	6.9068	6.9636	7.0191	7.0866	7.1523	7.2790	7.3999	7.5158	s	
0.03504	0.03615	0.03724	0.03832	0.03965	0.04096	0.04355	0.04609	0.04858	v	
3475.1	3524.5	3573.7	3622.7	3683.8	3744.7	3866.8	3989.1	4112.0	h	10000.0
6.7261	6.7863	6.8446	6.9013	6.9703	7.0373	7.1660	7.2886	7.4058	s	
0.02250	0.02331	0.02411	0.02488	0.02584	0.02677	0.02859	0.03036	0.03209	v	
3421.4	3475.0	3527.7	3579.8	3644.3	3708.3	3835.4	3962.1	4088.6	h	15000.0
6.4885	6.5535	6.6160	6.6764	6.7492	6.8195	6.9536	7.0806	7.2013	s	
0.01621	0.01688	0.01753	0.01816	0.01893	0.01967	0.02111	0.02250	0.02385	v	
3364.7	3423.0	3479.9	3535.5	3603.8	3671.1	3803.8	3935.0	4065.3	h	20000.0
6.3015	6.3724	6.4398	6.5043	6.5814	6.6554	6.7953	6.9267	7.0511	s	
0.009890	0.01043	0.01095	0.01144	0.01202	0.01258	0.01365	0.01465	0.01562	v	
3241.7	3312.1	3378.9	3443.0	3520.2	3595.0	3739.7	3880.3	4018.5	h	30000.0
5.9949	6.0805	6.1597	6.2340	6.3212	6.4033	6.5560	6.6970	6.8288	s	
0.006735	0.007219	0.007667	0.008088	0.008584	0.009053	0.009930	0.01075	0.01152	v	
3108.0	3193.4	3272.4	3346.4	3433.8	3517.0	3674.8	3825.9	3971.7	h	40000.0
5.7302	5.8340	5.9276	6.0135	6.1122	6.2035	6.3701	6.5210	6.6606	s	
0.004888	0.005328	0.005734	0.006111	0.006550	0.006960	0.007720	0.008420	0.009076	v	
2968.9	3070.7	3163.2	3248.3	3346.8	3438.9	3610.2	3770.9	3925.3	h	50000.0
5.4886	5.6124	5.7221	5.8207	5.9320	6.0331	6.2138	6.3749	6.5222	s	
0.003755	0.004135	0.004496	0.004835	0.005229	0.005596	0.006269	0.006885	0.007460	v	
2838.3	2951.7	3055.8	3151.6	3261.4	3362.4	3547.0	3717.4	3879.6	h	60000.0
5.2755	5.4132	5.5367	5.6477	5.7717	5.8827	6.0775	6.2483	6.4031	s	
0.002641	0.002886	0.003132	0.003379	0.003692	0.003974	0.004519	0.005017	0.005481	v	
2648.2	2765.1	2874.9	2980.3	3104.6	3220.3	3428.7	3616.7	3792.8	h	80000.0
4.9650	5.1072	5.2374	5.3595	5.4999	5.6270	5.8470	6.0354	6.2034	s	
0.002168	0.002326	0.002493	0.002668	0.002891	0.003106	0.003536	0.003952	0.004341	v	
2538.6	2648.2	2754.5	2857.5	2985.8	3105.3	3324.4	3526.2	3714.3	h	100000.0
4.7719	4.9050	5.0311	5.1505	5.2954	5.4267	5.6579	5.8600	6.0397	s	

PERTE DE VAPEUR PAR LES ORIFICES ÉVACUANT À L'ATMOSPHÈRE

TABLE 3

Diamètre de l'orifice, po	Perte de vapeur, lb/h lorsque la pression effective de la vapeur est de:											
	2 lb/po²	5 lb/po²	10 lb/po²	15 lb/po²	25 lb/po²	50 lb/po²	75 lb/po²	100 lb/po²	125 lb/po²	150 lb/po²	200 lb/po²	250 lb/po²
1/32	0.31	0.49	0.70	0.85	1.14	1.86	2.58	3.3	4.02	4.74	6.17	7.61
1/16	1.25	1.97	2.8	3.4	4.6	7.4	10.3	13.2	16.1	18.9	24.7	30.4
3/32	2.81	4.44	6.3	7.7	10.3	16.7	15.4	29.7	36.2	42.6	55.6	68.5
1/8	4.5	7.9	11.2	13.7	18.3	29.8	41.3	52.8	64.3	75.8	99.0	122.0
5/32	7.8	12.3	17.4	21.3	28.5	46.5	64.5	82.5	100.0	118.0	154.0	190.0
3/16	11.2	17.7	25.1	30.7	41.1	67.0	93.0	119.0	145.0	170.0	222.0	274.0
7/32	15.3	24.2	34.2	41.9	55.9	91.2	126.0	162.0	197.0	232.0	303.0	373.0
1/4	20.0	31.6	44.6	54.7	73.1	119.0	165.0	211.0	257.0	303.0	395.0	487.0
9/32	25.2	39.9	56.5	69.2	92.5	151.0	209.0	267.0	325.0	384.0	500.0	617.0
5/16	31.2	49.3	69.7	85.4	114.0	186.0	258.0	330.0	402.0	474.0	617.0	761.0
11/32	37.7	59.6	84.4	103.0	138.0	225.0	312.0	399.0	486.0	573.0	747.0	921.0
3/8	44.9	71.0	100.0	123.0	164.0	268.0	371.0	475.0	578.0	682.0	889.0	1096.0
13/32	52.7	83.3	118.0	144.0	193.0	314.0	436.0	557.0	679.0	800.0	1043.0	1286.0
7/16	61.1	96.6	137.0	167.0	224.0	365.0	506.0	647.0	787.0	928.0	1210.0	1492.0
15/32	70.2	111.0	157.0	192.0	257.0	419.0	580.0	742.0	904.0	1065.0	1389.0	1713.0
1/2	79.8	126.0	179.0	219.0	292.0	476.0	660.0	844.0	1028.0	1212.0	1580.0	1949.0

Conversion métrique
1 lb/h = 0,4536 kg/h
1 po = 25,4 mm
1 lb/po² = 6,897 kPa

DIFFÉRENCE DE TEMPÉRATURE MOYENNE LOGARITHMIQUE POUR LES APPLICATIONS DE CHAUFFAGE OU DE REFROIDISSEMENT

TABLE 4

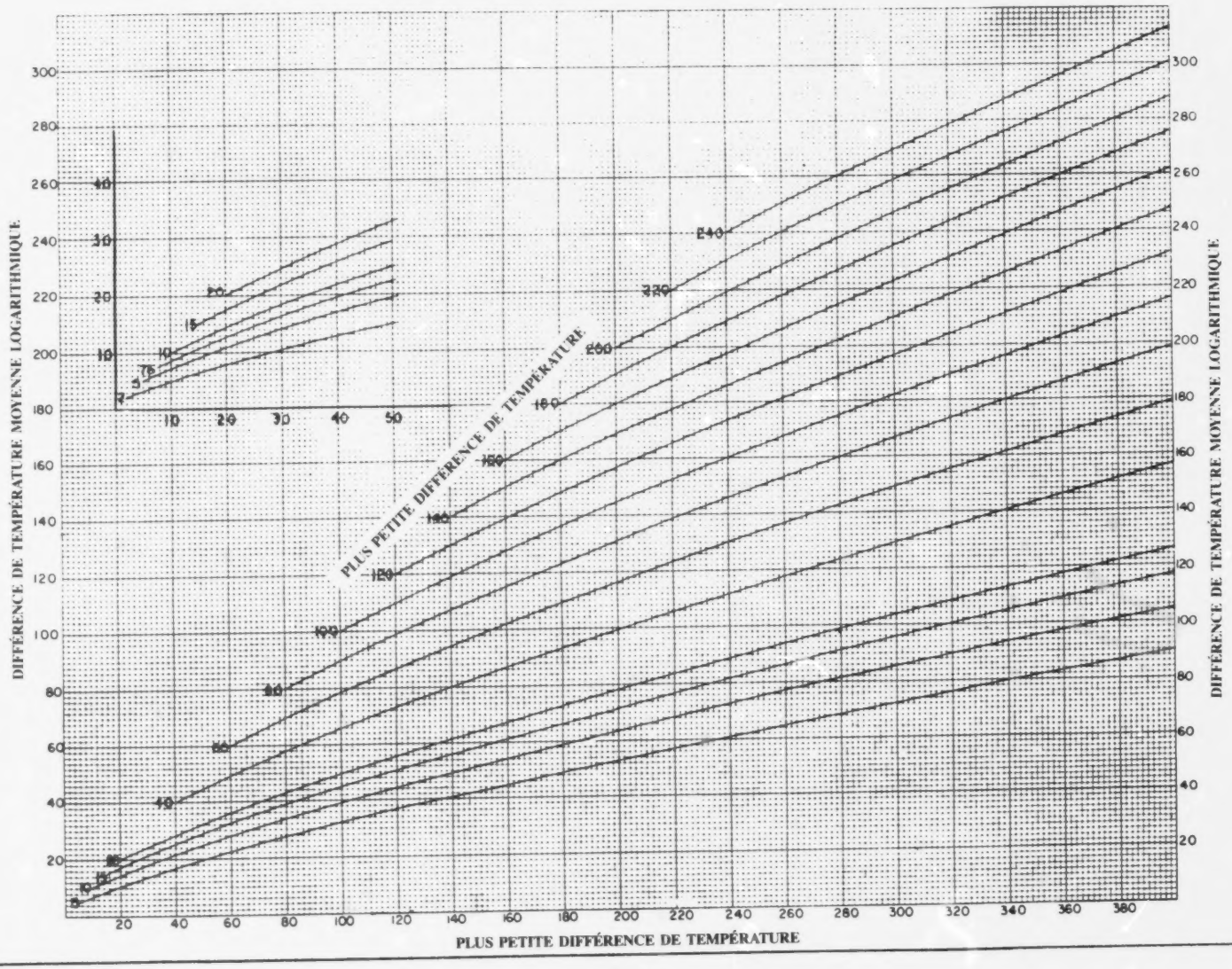
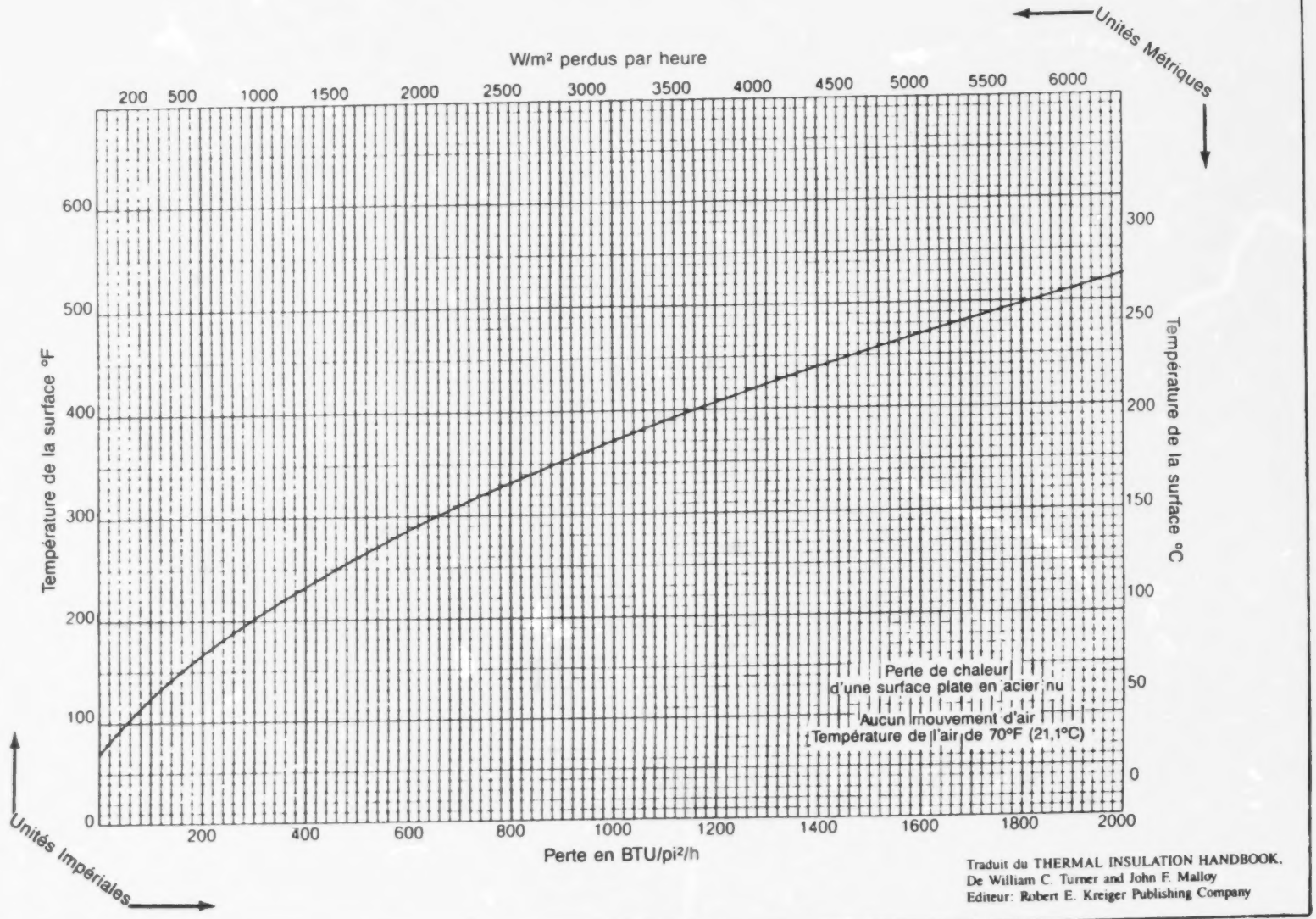
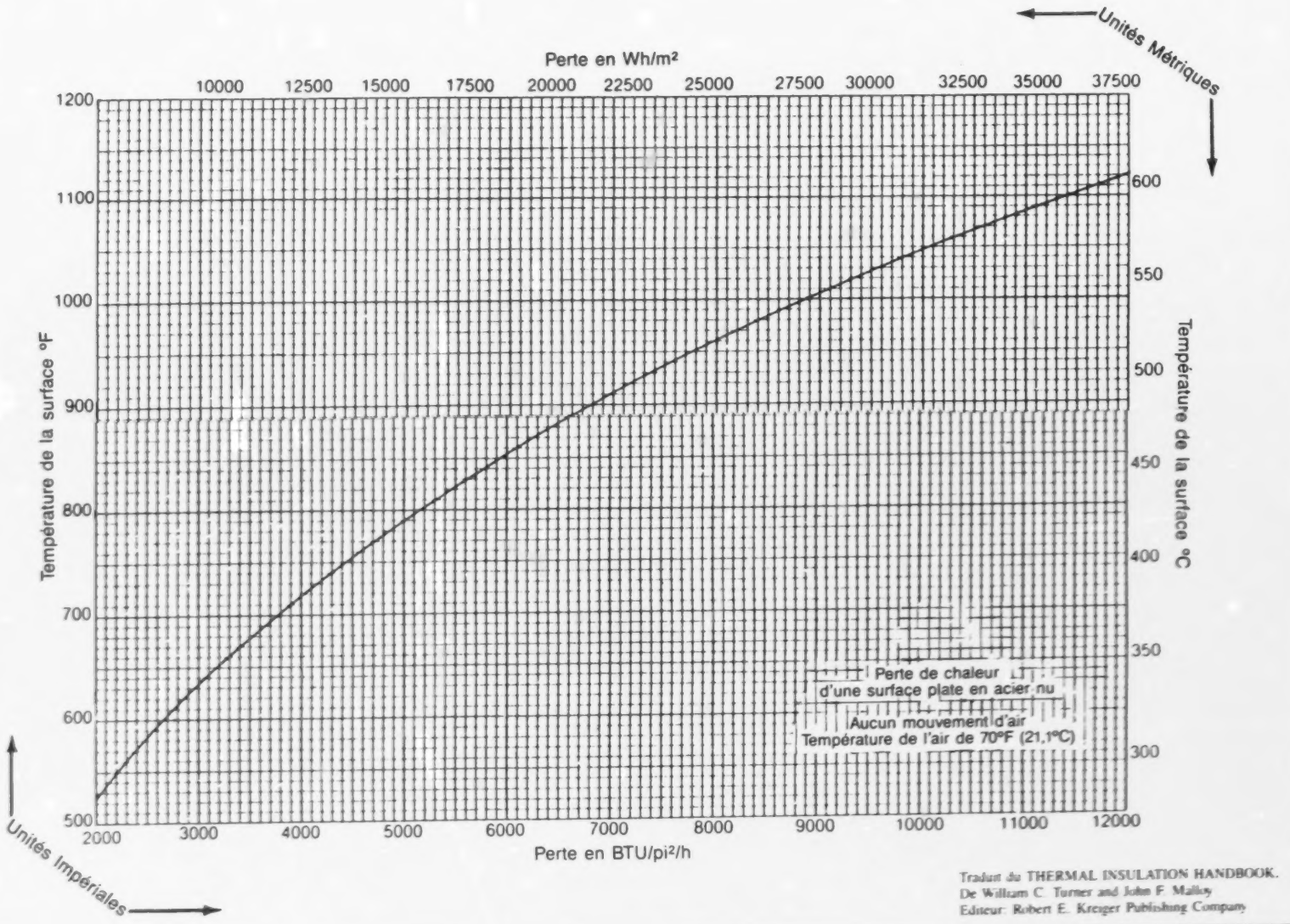


TABLE 5



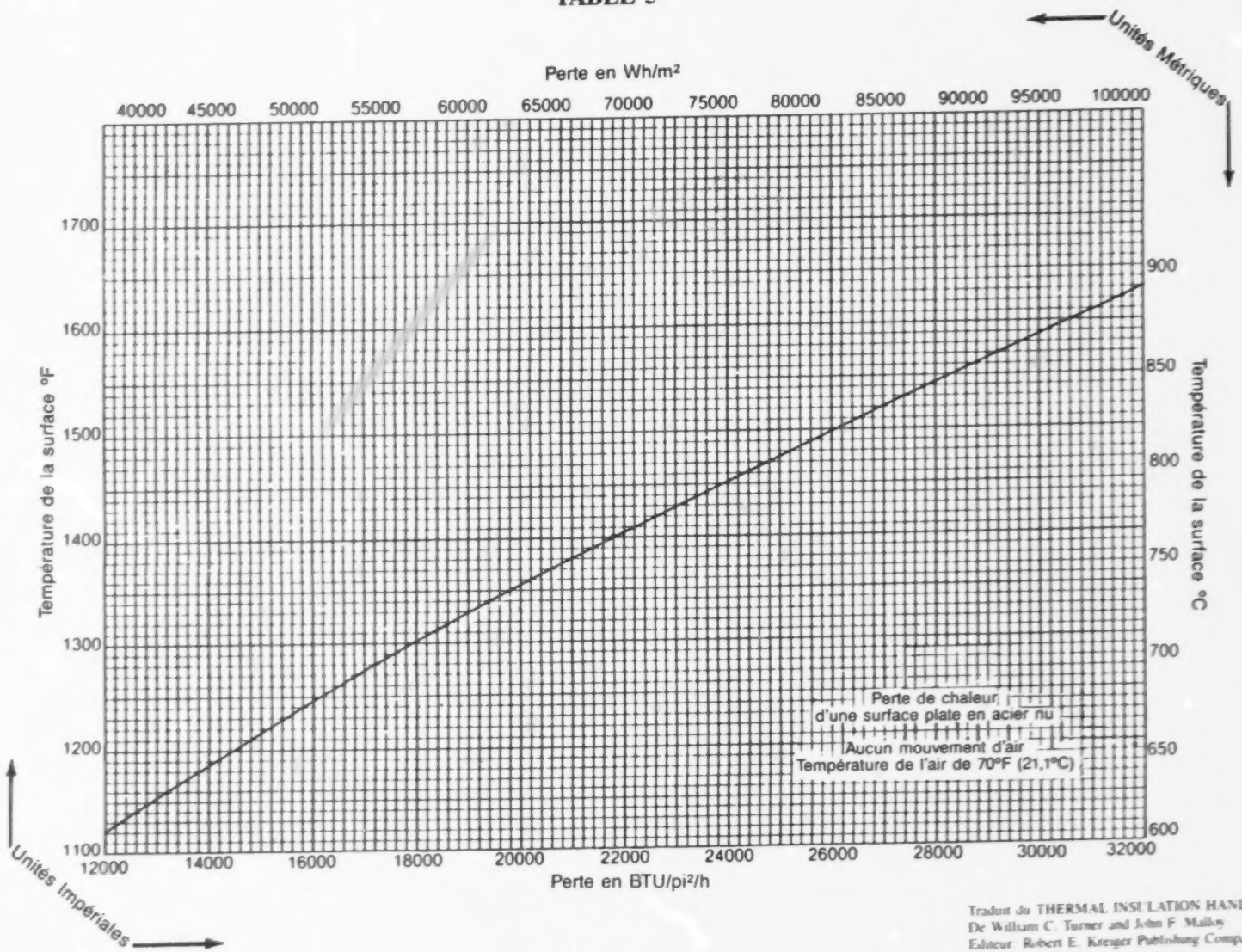
Traduit du THERMAL INSULATION HANDBOOK.
De William C. Turner and John F. Malloy
Editeur: Robert E. Kreiger Publishing Company

TABLE 5



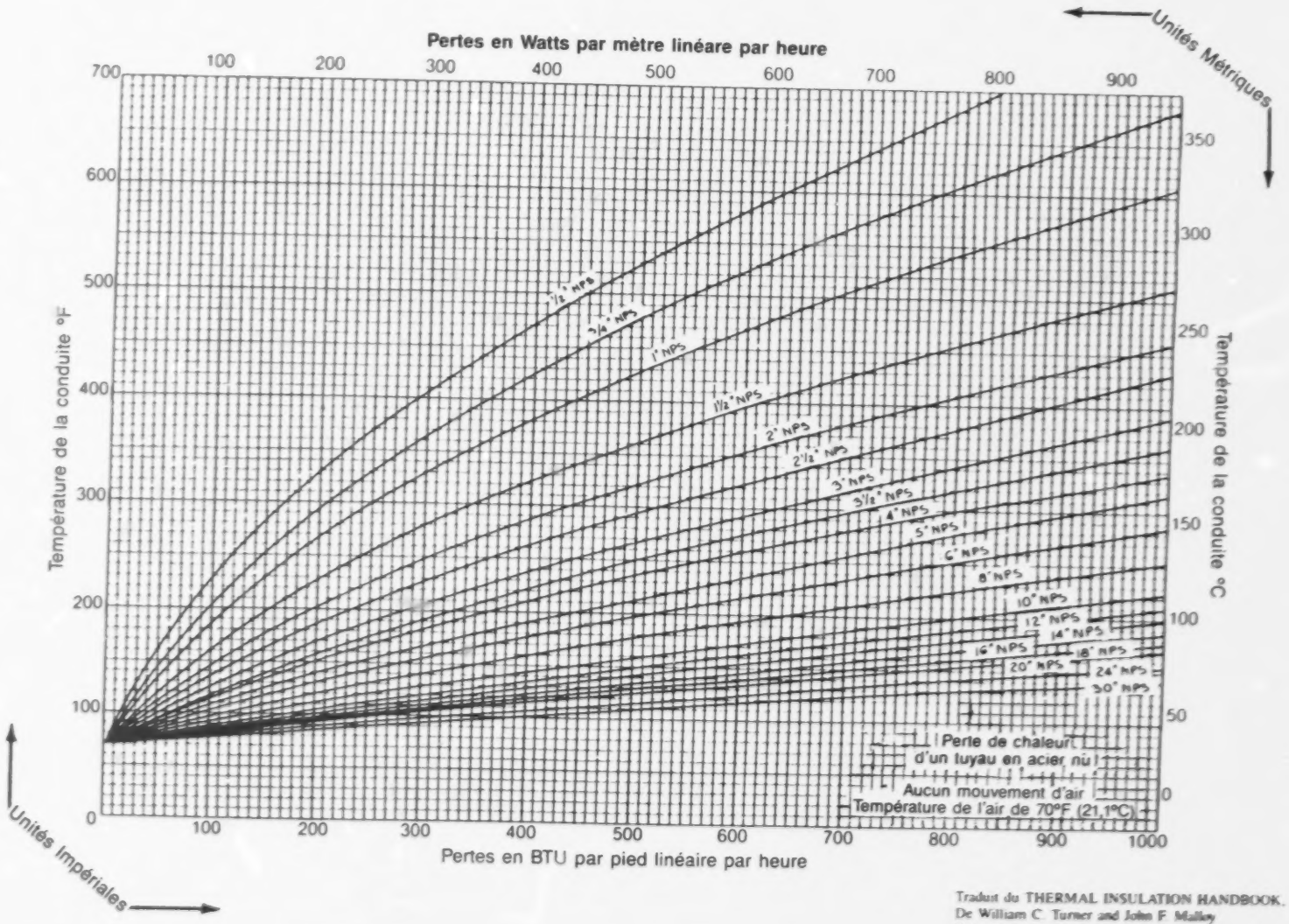
Traduit du THERMAL INSULATION HANDBOOK.
De William C. Turner and John F. Malloy
Editeur: Robert E. Kreiger Publishing Company

TABLE 5



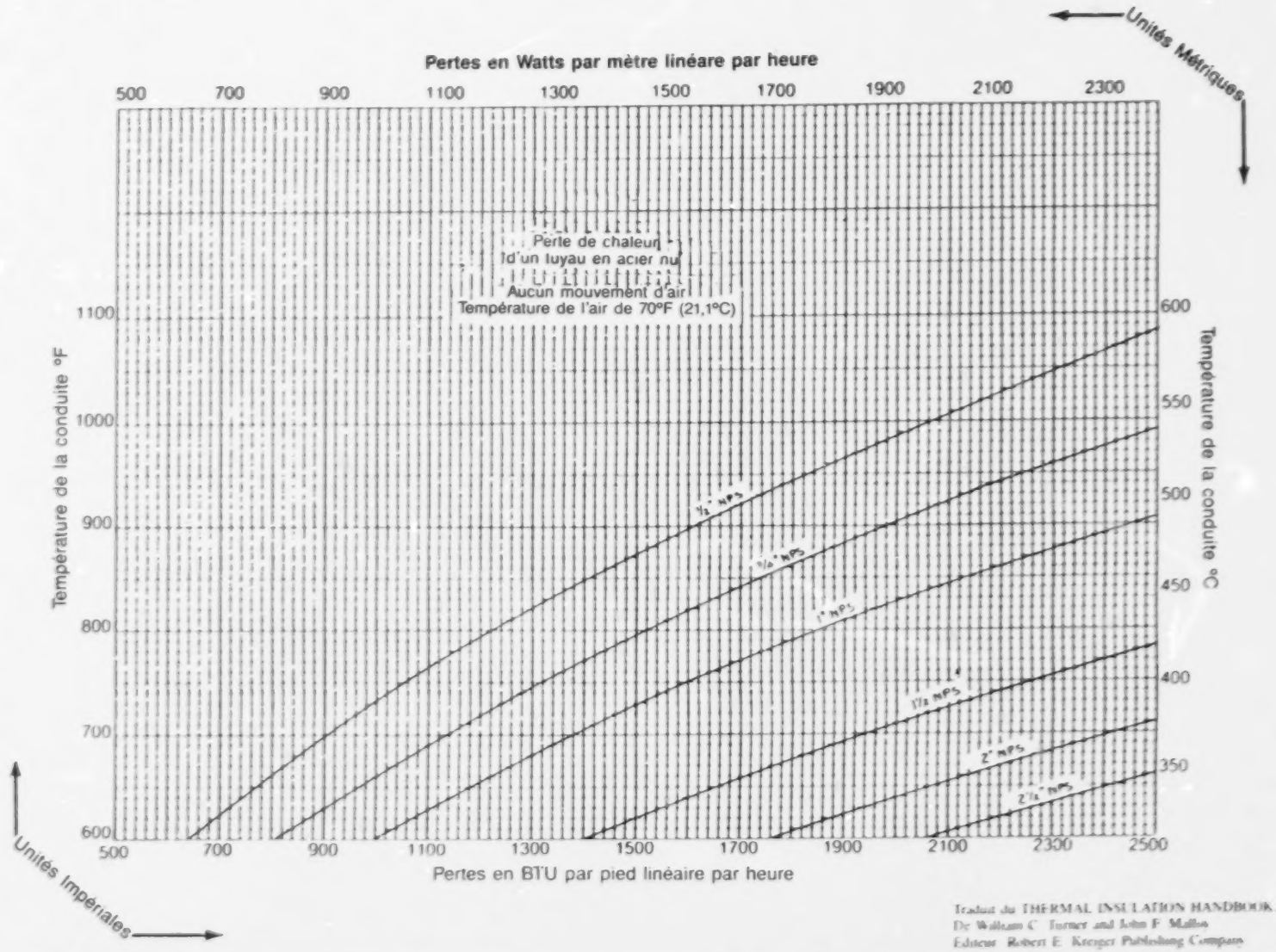
Traduit du THERMAL INSULATION HANDBOOK.
De William C. Turner and John F. Malloy
Editeur: Robert E. Krieger Publishing Company

TABLE 6



Traduit du THERMAL INSULATION HANDBOOK.
De William C. Turner and John F. Malloy
Editeur: Robert E. Krieger Publishing Company

TABLE 6



Traduit du THERMAL INSULATION HANDBOOK
De William C. Turner and John F. Malloy
Editeur Robert E. Krieger Publishing Company

TAUX DE CONSOMMATION DE VAPEUR TYPES
TABLE 7

	Pression de service lb/po² (eff).	Lb par h	
BOULANGERIES		En service	Maximum
Pétrin, 8 pi de long	10	4	
Étuves de fermentation finale, capacité de 500 pi³		7	
Fours: A sole fixe ou rôtissoire	10		
Pain blanc, surface de 120 pi²		29	
Pain de sègle, surface de 10 pi²		58	
Fours Master Baker		29	
Century Reel, w/pb par 100 lbs de pain		29	
Fours rotatifs, par plate-forme		29	
Bennett 400, plate-forme simple		44	
Hubbard (toute dimension)		58	
Middleby-Marshall, w/pb		58	
Fours à sole mobile, Baker-Perkins, plateau long (par 100 lbs)		13	
Fours à sole mobile, Baker-Perkins, plateau court (par 100 lbs)		29	
General Electric		20	
Rotatifs Fish Duothermic, par plate-forme		58	
Fours pivotants: moule à 8-10 brioches		29	
moule à 12-18 brioches		58	
moule à 18-28 brioches		87	
LAVAGE DE BOUTEILLES	5		
Boissons gazeuses, bière, etc.: par 100 bouteilles-min		310	
Litres de lait, par 100 caisses/h		58	
CONFISERIE ET CHOCOLATERIE	70		
Cuisson de bonbon, cuiseur de 30 gal, 1 heure		46	
Fonte du chocolat, récipient à enveloppe chauffante de 24" diam.		29	
Bouilloires trempeuses de chocolat, par surface de réservoir de 10 pi²		29	
Tempéreuses à chocolat, nappeuses, surface active de 20 pi² chacun		29	
Bouilloire à confiserie par pi² d'enveloppe	30		60
Bouilloire à confiserie par pi² de chauffante	75		100
CRÉMERIES ET LAITERIES	15-75		
Conserves de crème, 3 par minute			310
Pasteurisateur, par 100 gallons chauffés 20 min			282
LAVES-VAISSELLE	10-30		
Type à cuve à 2 compartiments			58
Type à gros convoyeur ou rouleau			58
Autosan, Colt, selon les dimensions		29	117
Champion, selon les dimensions		58	310
Hobart Crescent, selon les dimensions		29	186
Fan Spray, selon les dimensions		58	248
Crescent, commande de vapeur manuelle	30		
Hobart modèle AM-5	10		
Lave-vaisselle	15-20	60-70	
ÉQUIPEMENT D'HÔPITAL	40-50		
Alambics, par 100 gallons d'eau distillée		102	
Stérilisateurs, bassin hygiénique		3	
Stérilisateurs, pansements, par 10 po de longueur, env.		7	
Stérilisateurs, instrument, par 100 po³ env.		3	
Stérilisateurs, eau, par 10 gallons, env.		6	
Fours stérilisateurs, à double porte:	40-50		
Jusqu'à 50 pi³ par 10 pi³ env.		29	
50 à 100 pi³, par 10 pi³ env.		21	
100 et plus, par 10 pi³ env.		16	

TAUX DE CONSOMMATION DE VAPEUR TYPES
TABLE 7

	Pression de service lb/po² (eff).	Lb par h	
		En service	Maximum
ÉQUIPEMENT D'HÔPITAL (suite)			
Stérilisateurs, Type non-pressurisé			
Pour bouteilles ou pasteurisation	40		
Début avec eau à 70°F, maintenue pour 20 minutes en ébullition à une profondeur de 3 po		51	69
Instruments et ustensiles:	40		
Début avec une eau à 70°F, ébullution pendant 20 min:			
Profondeur 3,5 po: dim. 8 × 9 × 18 po		27	27
Profondeur 3,5 po: dim. 9 × 20 × 10 po		30	30
Profondeur 4 po: dim. 10 × 12 × 22 po		39	39
Profondeur 4 po: dim. 12 × 16 × 24 po		60	60
Profondeur 4 po: dim. 10 × 12 × 36 po		66	66
Profondeur 10 po: dim. 16 × 15 × 20 po		92	92
Profondeur 10 po: dim. 20 × 20 × 24 po		144	144
ÉQUIPEMENT DE BLANCHISSAGE	100		
Alambic sous-vide, par 10 gallons		16	
Table de détachage, tendeur de pantalons		29	
Machine à apprêter les robes, formeuse de pardessus, chacun		58	
Machine à apprêter les vestons, Susie Q, chacun		44	
Table d'apprêtage sous-vide, table à repasser à dôme 18 po., ch.		20	
Fers à repasser à vapeur, chacun		4	
Fers à repasser:	100		
48 × 120 po, 1 cylindre		248	
48 × 120 po, 2 cylindres		310	
4 rouleaux, 100 à 120 po		217	
6 rouleaux, 100 à 120 po		341	
8 rouleaux, 100 à 120 po		465	
Équipement pour les chemises	100		
Poignet simple, col, empiècement No. 3, chacun		7	
Manche double		13	
Corps		29	
Plastron		44	
Salles de séchage	100		
Couverture		20	
Convoyeur, par boucle, env.		7	
Chariot, par porte, env.		58	
Rideau, 50 par 114		29	
Rideau, 64 par 130		58	
Cuiseur d'empois, capacité de 10 gallons		7	
Machine à apprêter, par 10 po de longueur, env.		5	
Presses, par 10 po de longueur, env.		7	
Fers à repasser maniables, par 10 po de longueur, env.		5	
Équipement pour les cols: machine à repasser les cols et les poignets		21	
Désodorisateur		87	
Machine à défroisser les draps (wind whip)		58	
Machine à défroisser les draps double (wind whip)		87	
Tambours de séchage, usage général autre source	100		
36 po, par 10 po de longueur, env.		29	
40 po, par 10 po de longueur, env.		38	
42 po, par 10 po de longueur, env.		52	
Vorcone, 46 par 120 po		310	
Presses, vide central, 42 po		20	
Presses, vapeur, 42 po		29	

TAUX DE CONSOMMATION DE VAPEUR TYPES
TABLE 7

	Pression de service lb/po² (eff).	Lb par h	
		En service	Maximum
MOULAGE DU PLASTIQUE			
Chaque 12 à 15 pi² de surface de plateau	125	29	
PÂTES ET PAPIER			
Machines à onduler par 1 000 pi²	175	29	
Pâte de bois, par 100 lbs de papier	50	372	
ÉQUIPEMENT DE RESTAURANT	5-20		
Tables à vapeur standard, par pi de longueur		36	
Tables à vapeur standard, par réservoir de 20 pi²		29	
Bain-marie, par pi de longueur, 30 po de large		13	
Bain-marie, par réservoir de 10 pi²		29	
Fontaines à café, par 10 gallons, eau d'appoint froide		13	
Coquetière à 3 compartiments		13	
Marmites à vapeur pour huître		13	
Marmite à vapeur pour palourde ou homard		29	
Chaudrons à chemise de vapeur	5-20		
Capacité de 10 gallons		13	
Chaudron pour bouillon, 25 gallons		29	
Chaudron pour bouillon, 40 gallons		44	
Chaudron pour bouillon, 60 gallons		58	
Chauffe-plats	5-20		
Par étagère de 100 pi² Par étagère de 20 pi³		58	
Réchauds, par 20 pi³		29	
Marmite à vapeur pour légumes, par compartiment		29	
Marmite à vapeur pour pommes de terre		29	
Morandi Proctor, 30 comp., sans retour		87	
Évier pour marmite, jets de vapeur, usage moyen		29	
Polissoirs d'argent, Tahara		58	
MIROITERIE			
Tables à vapeur standard	102		
ATELIERS DE PNEUS	100		
Moules de camion, grande dimension		87	
Moules de camion, moyenne dimension		58	
Moules de passager		29	
Sections, par section		7	
Fer à vulcaniser, chacun		7	

CONVERSIONS COURANTES

1 baril (35 gal imp.) (42 gal U.S.)	= 159,1 litres
1 gallon (imp.)	= 1,20094 gallon (U.S.)
1 cheval vapeur (chaudière)	= 9809,6 watts
1 cheval vapeur	= 2545 Btu/heure
1 cheval vapeur	= 0,746 kilowatts
1 joule	= 1 N-m
Kelvin	= (°C + 273,15)
1 kilowatt-heure	= 3600 kilojoules
1 Newton	= 1 Kg-m/s^2
1 thermie	= 10^5 Btu
1 tonne (réfrigérant)	= 12002,84 Btu/heure
1 tonne (réfrigérant)	= 3516,8 watts
1 watt	= 1 joule/seconde
degré Rankine	= (°F + 459,67)

Cubes

1 v^3 = 27 pi^3

1 pi^3 = 1728 po^3

1 cm^3 = 1000 mm^3

1 m^3 = 10^6 cm^3

1 m^3 = 1000 L

Carrés

1 v^2 = 9 pi^2

1 pi^2 = 144 po^2

1 cm^2 = 100 mm^2

1 m^2 = 10000 cm^2

PRÉFIXES SI

Préfixe	Symbole	Valeur numérique	Exposant
téra	T	1 000 000 000 000	10^{12}
giga	G	1 000 000 000	10^9
méga	M	1 000 000	10^6
kilo	k	1 000	10^3
hecto	h	100	10^2
déca	da	10	10^1
déci	d	0,1	10^{-1}
centi	c	0,01	10^{-2}
milli	m	0,001	10^{-3}
micro	u	0,000 001	10^{-6}
nano	n	0,000 000 001	10^{-9}
pico	p	0,000 000 000 001	10^{-12}

TABLES DE CONVERSION DES UNITÉS MÉTRIQUES EN UNITÉS IMPÉRIALES

DE	SYMBOLE	À	SYMBOLE	VALEUR NUMÉRIQUE
ampère/centimètre carré	A/cm^2	ampère/pouce carré	A/po^2	6,452
degré Celsius	°C	degré Fahrenheit	°F	(°C × 9/5) + 32
centimètre	cm	pouce	po	0,3937
centimètre cube	cm^3	pouce cube	po^3	0,06102
mètre cube	m^3	pied cube	pi^3	35,314
gramme	g	once	oz	0,03527
gramme	g	livre	lb	0,0022
gramme/litre	g/L	livre/pied cube	lb/pi^3	0,06243
joule	J	Btu	Btu	$9,480 \times 10^{-4}$
joule	J	pied-livre	pi-lb	0,7376
joule	J	cheval vapeur-heure	cv-h	$3,73 \times 10^{-7}$
joule/mètre, (Newton)	J/m, N	livre	lb	0,2248
kilogramme	kg	livre	lb	2,205
kilogramme	kg	tonne (longue)	tonne	$9,842 \times 10^{-4}$
kilogramme	kg	tonne (courte)	tn	$1,102 \times 10^{-3}$
kilomètre	km	mille	mille	0,6214
kilopascal	kPa	atmosphère	atm	$9,87 \times 10^{-3}$
kilopascal	kPa	pouce de mercure (32°F)	po de Hg	0,2953
kilopascal	kPa	pouce d'eau (4°C)	po d'H_2O	4,0147
kilopascal	kPa	livre/pouce carré	lb/po^2	0,1450
kilowatt	kW	pied-livre/seconde	pi-lb/s	737,6
kilowatt	kW	cheval vapeur	cv	1,341
kilowatt-heure	kWh	Btu	Btu	3413
litre	L	pied cube	pi^3	0,03531
litre	L	gallon (imp.)	gal (imp.)	0,21998
litre	L	gallon (U.S.)	gal (U.S.)	0,264
litre/seconde	L/s	pied cube/minute	pi^3/min	2,1186
lumen/mètre carré	lm/m^2	lumen par pied carré	lm/pi^2	0,09290
lux, lumen/mètre carré	lx, lm/m^2	pied bougie	pi-b	0,09290
mètre	m	pied	pi	3,281
mètre	m	verge	yd	1,09361
partie par million	ppm	grain/gallon (imp.)	gr/gal (imp.)	0,07
partie par million	ppm	grain/gallon (U.S.)	gr/gal (U.S.)	0,05842
perméance (métrique)	PERM	perméance (imp.)	perm	0,01748
centimètre carré	cm^2	pouce carré	po^2	0,1550
mètre carré	m^2	pied carré	pi^2	10,764
mètre carré	m^2	verge carré	v^2	1,196
tonne (métrique)	t	livre	lb	2204,6
watt	W	Btu/heure	Btu/h	3,413
watt	W	lumen	lm	668,45

TABLES DE CONVERSION DES UNITÉS IMPÉRIALES EN UNITÉS MÉTRIQUES

DE	SYMBOLE	À	SYMBOLE	VALEUR NUMÉRIQUE
ampère/po^2	A/po^2	ampère/cm^2	A/cm^2	0,1550
atmosphère	atm	kilopascal	kPa	101,325
British Thermal Unit	Btu	joule	J	1054,8
Btu	Btu	kilogramme-mètre	kg-m	107,56
Btu	Btu	kilowatt-heure	kWh	$2{,}928 \times 10^{-4}$
Btu/heure	Btu/h	watt	W	0,2931
calorie, gramme	cal ou	g-cal joule	J	4,186
chaîne	chaîne	mètre	m	20,11684
pied cube	pi^3	mètre cube	m^3	0,02832
pied cube	pi^3	litre	L	28,32
pied cube/minute	pi^3/m	litre/seconde	L/s	0,47195
cycle/seconde	c/s	Hertz	Hz	1,00
degré Fahrenheit	°F	degré Celsius	°C	(°F−32)/1,8
pied	pi	mètre	m	0,3048
pied bougie	pi-b	lux, lumen/mètre carré	lx, lm/m^2	10,764
pied lambert	pi-L*	candela/mètre carré	cd/m^2	3,42626
pied-livre	pi-lb	joule	J	1,356
pied-livre	pi-lb	kilogramme-mètre	kg-m	0,1383
pied livre/seconde	pi-lb/s	kilowatt	kW	$1{,}356 \times 10^{-3}$
gallon (imp.)	gal (imp.)	litre	L	4,546
gallon (U.S.)	gal (U.S.)	litre	L	3,785
grain/gallon (imp.)	gr/gal(imp.)	partie par million	ppm	14,286
grain/gallon (U.S.)	gr/gal(U.S.)	partie par million	ppm	17,118
cheval vapeur	cv	watt	W	745,7
cheval vapeur-heure	cv-h	joule	J	$2{,}684 \times 10^6$
pouce	po	centimètre	cm	2,540
pouce de mercure (32°F)	po de Hg	kilopascal	kPa	3,386
pouce d'eau (4°C)	po d'H_2O	kilopascal	kPa	0,2491

TABLES DE CONVERSION DES UNITÉS IMPÉRIALES EN UNITÉS MÉTRIQUES (CONT.)

DE	SYMBOLE	À	SYMBOLE	VALEUR NUMÉRIQUE
lambert	L*	candela/mètre carré	cd/m^2	3,183
lumen/pied carré	lm/pi^2	lumen/mètre carré	lm/m^2	10,76
lumen	lm	watt	W	0,001496
mille	mille	kilomètre	km	1,6093
once	oz	gramme	g	28,35
perm (0°C)	perm	kilogramme par pascal-seconde-mètre carré	$kg/(Pa\text{-}s\text{-}m^2)$ (PERM)	$5{,}721 \times 10^{-11}$
perm (23°C)	perm	kilogramme par pascal-seconde-mètre carré	$kg/(Pa\text{-}s\text{-}m^2)$ (PERM)	$5{,}745 \times 10^{-11}$
perm-pouce (0°C)	perm-po	kilogramme par pascal-seconde-mètre	kg/(Pa-s-m)	$1{,}4532 \times 10^{-12}$
perm-pouce (23°C)	perm-po	kilogramme par pascal-seconde-mètre	kg/(Pa-s-m)	$1{,}4593 \times 10^{-12}$
chopine (imp.)	chopine	litre	L	0,56826
livre	lb	gramme	g	453,5924
livre	lb	joule/mètre (Newton)	J/m N	4,448
livre	lb	kilogramme	kg	0,4536
livre	lb	tonne (métrique)	t	$4{,}536 \times 10^{-4}$
livre/pied cube	lb/pi^3	gramme/litre	g/L	16,02
livre/pouce carré	lb/po^2	kilopascal	kPa	6,89476
pinte	pinte	litre	L	1,1365
slug	slug	kilogramme	kg	14,5939
pied carré	pi^2	mètre carré	m^2	0,09290
pouce carré	po^2	centimètre carré	cm^2	6,452
verge carré	v^2	mètre carré	m^2	0,83613
tonne (longue)	ton	kilogramme	kg	1016
tonne (courte)	tn	kilogramme	kg	907,185
verge	v	mètre	m	0,9144

* "L" tel qu'utilisé dans l'éclairement.

Les valeurs typiques qui suivent peuvent servir de facteurs de conversion quand les données réelles manquent. Les équivalents en MJ et en BTU correspondent à la chaleur de combustion. Les chiffres applicables aux hydrocarbures correspondent à la valeur calorifique la plus élevée (poids humide). Certains produits sont de toute évidence des matières premières, mais ont été inclus au tableau pour le rendre plus complet et pour servir de référence. Les facteurs de conversion pour le charbon sont approximatifs puisque la valeur calorifique de ce produit varie selon la mine d'où il a été extrait.

TYPE D'ÉNERGIE	MÉTRIQUE	IMPÉRIAL
CHARBON		
— métallurgique	29 000 mégajoules/tonne	25,0 × 10^6 BTU/tonne
— anthracite	30 000 mégajoules/tonne	25,8 × 10^6 BTU/tonne
— bitumineux	32 100 mégajoules/tonne	27,6 × 10^6 BTU/tonne
— sous-bitumineux	22 100 mégajoules/tonne	19,0 × 10^6 BTU/tonne
— lignite	16 700 mégajoules/tonne	14,4 × 10^6 BTU/tonne
COKE		
— métallurgique	30 200 mégajoules/tonne	26,0 × 10^6 BTU/tonne
— pétrolier		
— brut	23 300 mégajoules/tonne	20,0 × 10^6 BTU/tonne
— calciné	32 600 mégajoules/tonne	28,0 × 10^6 BTU/tonne
POIX	37 200 mégajoules/tonne	32,0 × 10^6 BTU/tonne
PÉTROLE BRUT	38,5 mégajoules/litre	5,8 × 10^6 BTU/baril
MAZOUT N° 2	38,68 mégajoules/litre	5,88 × 10^6 BTU/baril 0,168 × 10^6 BTU/GI
PÉTROLE N° 4	40,1 mégajoules/litre	6,04 × 10^6 BTU/baril 0,173 × 10^6 BTU/GI
PÉTROLE N° 6 (MAZOUT LOURD C)		
— 2,5 % soufre	42,3 mégajoules/litre	6,38 × 10^6 BTU/baril 0,182 × 10^6 BTU/GI
— 1,0 % soufre	40,5 mégajoules/litre	6,11 × 10^6 BTU/baril 0,174 × 10^6 BTU/GI
— 0,5 % soufre	40,2 mégajoules/litre	6,05 × 10^6 BTU/baril 0,173 × 10^6 BTU/GI
KÉROSÈNE	37,68 mégajoules/litre	0,167 × 10^6 BTU/GI
DIESEL	38,68 mégajoules/litre	0,172 × 10^6 BTU/GI
GAZOLINE	36,2 mégajoules/litre	0,156 × 10^6 BTU/GI
GAZ NATUREL	37,2 mégajoules/m^3	1,00 × 10^6 BTU/M pi^3
PROPANE	50,3 mégajoules/kg 26,6 mégajoules/litre	0,02165 × 10^6 BTU/lb 0,1145 × 10^6 BTU/GI
ÉLECTRICITÉ	3,6 mégajoules/kWh	0,003413 × 10^6 BTU/kWh

Calcul de la vitesse de circulation de la vapeur

Feuille de travail 9-1

Entreprise: _____ Date: _____

Endroit: _____ Par: _____

Diamètre intérieur de la conduite de vapeur _____ m

Débit de vapeur (w) _____ kg/h

Volume spécifique de la vapeur (v_g) _____ m^3/kg

Section de la conduite (A) $= \frac{3{,}142 \times (\text{diam. int.})^2}{4}$

$= \frac{3{,}142 \times (\quad\quad\quad\quad\quad)^2}{4}$

$=$ _____ m^2

Vitesse (V) $= \frac{w \times v_g}{A \times 3\,600}$

$=$ _____

$=$ _____ m/s

Pour les conduites principales de vapeur, la vitesse devrait se situer entre 40 et 60 m/s. Si la vitesse dépasse 75 m/s, il faut réduire le débit ou employer une conduite de plus grand diamètre.

Perte de vapeur dans l'atmosphère

Feuille de travail 9-2

Entreprise: _____ Date: _____

Endroit: _____ Par: _____

Appareil: _____

Diamètre estimé de la fuite: _____ mm

Pression de vapeur: _____ kPa(effectifs)

Perte de vapeur: _____ kg/h (Table 3)

Durée de service: Nombre d'heures par jour: _____

Nombre de jours par semaine: _____

Nombre de semaines par année: _____

Coût de la vapeur: _____ $/1 000 kg (À obtenir de l'opérateur du générateur de vapeur)

Vapeur perdue = _____ kg/h x _____ h/jour x _____ jours/sem. x _____ sem./an

= _____ kg/an

Économies potentielles en dollars:

= _____ kg/an x _____ $/1 000 kg

= _____ $ par année

Calcul de l'écart logarithmique moyen de température (LMTD)

Feuille de travail 9-3

Entreprise: _____ Date: _____

Endroit: _____ Par: _____

Utilisation du chauffage

Température initiale du liquide (T_2) _____ °C

Température finale du liquide (T_3) _____ °C

Température de la vapeur (T_1) _____ °C

Plus grand écart de température (DT_1) $= T_1 - T_2$

$=$ _____ $-$ _____

$=$ _____ °C

Plus petit écart de température (DT_2) $= T_1 - T_3$

_____ $-$ _____

$=$ _____ °C

LMTD $= \dfrac{DT_1 - DT_2}{\ln\left(\dfrac{DT_1}{DT_2}\right)}$

$=$ _____

$\ln$ _____

ou, $=$ _____

2,306 log _____

$=$ _____

$=$ _____ °C

Pertes de chaleur par la tuyauterie

Feuille de travail 9-4

Entreprise: _____ Date: _____

Endroit: _____ Par: _____

Diamètre de conduite: _____ NPS Longueur de conduite: _____ m

Température de conduite: _____ °C Heures de service par année: _____

Type d'isolant proposé: _____ Épaisseur proposée: _____ mm

Sans isolant	Avec isolant
Perte de chaleur par mètre: _____ W/(m·h)(Table 6)	_____ W/(m·h)(Module 1)
Perte de chaleur totale par heure: (Perte de chaleur/mètre) x longueur	Perte de chaleur /mètre x longueur
_____ x _____	_____ x _____
_____ W/h	_____ W/h
Perte de chaleur annuelle: Perte de chaleur/h x h/an	Perte de chaleur/h x h/an
_____ x _____	_____ x _____
_____ W/an (1)	_____ W/an (2)

Diminution des pertes de chaleur grâce à la pose d'un isolant

= (1) − (2)

= _____ − _____

= _____ W/an

ou _____ W/an x 3,6 kJ/W

= _____ kJ/an

Les économies annuelles peuvent alors être calculées en dollars en employant le coût par unité de combustible. S'assurer que les unités de calcul sont compatibles.

Pertes de chaleur par les appareils

Feuille de travail 9-5

Entreprise: _____ Date: _____

Endroit: _____ Par: _____

Appareil: _____ Heures de service par année: _____

Superficie: _____ m^2 Type d'isolant proposé: _____

Température du produit: _____ °C Épaisseur d'isolant proposée: _____ mm

Sans isolant	Avec isolant
Perte de chaleur: = _____ Wh/m^2(Table 5)	_____ Wh/m^2(Module 1)
Perte de chaleur totale per heure: Superficie x perte de chaleur	Superficie x perte de chaleur
_____ x _____	_____ x _____
_____ W/h	_____ W/h
Perte de chaleur annuelle: Perte de chaleur/h x h/an	Perte de chaleur/h x h/an
_____ x _____	_____ x _____
_____ W/an (1)	_____ W/an (2)

Diminution des pertes de chaleur grâce à la pose d'un isolant

= (1) – (2)

= _____ – _____

= _____ W/an

ou _____ W/an x 3,6 kJ/W

= _____ kJ/an

Les économies annuelles peuvent alors être calculées en dollars en employant le coût par unité de combustible. S'assurer que les unités de calcul sont compatibles.

Quantité de chaleur contenue dans un écoulement d'eau
(Méthode approximative)
Feuille de travail 9-6

Entreprise: _____ Date: _____

Endroit: _____ Par: _____

Ecoulement d'eau: _____

Débit d'eau (fw) _____ L/s

Température de l'eau à l'entrée(T_1) _____ °C

Température de l'eau à la sortie(T_2) _____ °C

Chaleur totale transmise Q (MJ/h)

$$Q = fw \times (T_1 - T_2) \times 15$$

$$= ____ \times (____ - ____) \times 15$$

$$= ____ \text{ MJ/h}$$

Quantité de chaleur disponible dans un écoulement d'eau rejetée pour préchauffer un autre courant d'eau

(méthode approximative)
Feuille de travail 9-7
Page 1 de 2

Entreprise: _____ Date: _____

Endroit: _____ Par: _____

Courant d'eau rejetée: _____

- Débit d'eau (fw): _____ L/s
- Température actuelle de l'eau (T_1): _____ °C
- Température proposée de l'eau à sortie (T_2): _____ °C
  (On doit déterminer cette température avec le fabricant de l'échangeur de chaleur.)
- Quantité de chaleur disponible Q

$$Q = fw \times (T_1 - T_2) \times 15$$

$$= \frac{\quad \times (\quad - \quad) \times 15}{}$$

$$= _____ \text{ MJ/h}$$

$$\text{ou} \quad \frac{_____ \text{ MJ/h}}{3\,600}$$

$$= _____ \text{ MJ/s}$$

Rendement de l'échangeur de chaleur proposé: _____ %
(à obtenir du fabricant de l'échangeur)

Quantité de chaleur disponible = _____ MJ/s x _____ %

= _____ MJ/s (1)

Quantité de chaleur disponible dans un écoulement d'eau rejetée pour préchauffer un autre écoulement d'eau

(méthode approximative)
Feuille de travail 9-7
Page 2 de 2

Entreprise: _____ Date: _____

Endroit: _____ Par: _____

Courant d'eau à réchauffer:

Débit d'eau (fw): _____ L/s

Témperature de l'eau à entrée (T_1): _____ °C

Température finale désirée (T_2) _____ °C

Quantité de chaleur nécessaire Q

$$Q = fw \times (T_1 - T_2) \times 15$$

$$= \frac{\quad \times (\quad - \quad) \times 15}{}$$

$$= -_____ \text{ MJ/h}$$

ou $\frac{_____}{3\,600}$ MJ/h (Négliger le signe négatif)

$$= _____ \text{ MJ/s} \quad (2)$$

Dimunition de l'énergie calorifique nécessaire pour chauffer le courant d'eau à la température finale désirée:

$$= (2) \text{ MJ/s} - (1) \text{ MJ/s}$$

$$= _____ - _____$$

$$= _____ \text{ MJ/s} \quad (3)$$

Besoins de vapeur pour chauffer de l'eau dans un échangeur de chaleur vapeur-eau

(méthode approximative)
Feuille de travail 9-8
Page 1 de 2

Entreprise: _____ Date: _____

Endroit: _____ Par: _____

Vapeur

Pression	_____	kPa(eff.)	
Température	_____	°C	
Enthalpie	_____	kJ/kg	(1)

Condensat

Pression	_____	kPa(eff.)	
Température	_____	°C	
Enthalpie	_____	kJ/kg	(2)

Chaleur disponible dans la vapeur

(1) − (2)

= _____ − _____

= _____ kJ/kg (3)

Rendement de l'échangeur de chaleur: _____ % (4)

Chaleur disponible pour chauffer l'eau = (3) x (4) kJ/kg

= _____ x _____

= _____ kJ/kg

ou $\frac{\text{_____}}{1000}$ kJ/kg / kJ/MJ

= _____ MJ/kg (5)

Vapeur nécessaire au chauffage (sans récupération de chaleur) = $\frac{\text{Feuille de travail 9-7 (2)}}{\text{Feuille de travail 9-8 (5)}}$

= _____ MJ/s / MJ/kg

_____ kg/s (6)

Besoins de vapeur pour chauffer de l'eau dans un échangeur de chaleur vapeur-eau

(méthode approximative)
Feuille de travail 9-8
Page 2 de 2

Entreprise: _____ Date: _____

Endroit: _____ Par: _____

Vapeur nécessaire au chauffage (avec récupération de la chaleur) = Feuille de travail 9-7 (3) / Feuille de travail 9-8 (5)

= _____ MJ/s / MJ/kg

= _____ kg/s (7)

Économies de vapeur dues à la récupération de la chaleur = (6) − (7)

= _____ − _____

= _____ kg/s (8)

Heures de service par année = _____ h (9)

Économies annuelles de vapeur par récupération de la chaleur = (8) x (9) x 3 600

= _____

= _____ kg/an (10)

Coût de la vapeur = _____ $ /1 000 kg (11)

Économies annuelles en dollars = (10) x (11)

= _____ x _____

= _____ $ par année (12)

Coût installé de l'équipement de récupération de la chaleur = _____ $ (13)

Période de rentabilité = (13) / (12)

= _____

= _____ ans